COMITE FRANCAIS GEOSYNTHETIQUES

Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion

Édition de janvier 2003

COMITE DE RÉDACTION

Le groupe de travail :

Monsieur ANTOINE	DDE 66 SERVICE MARITIME LANGUEDOC ROUSSILLON
Monsieur BRIOIST	CETMEF
Monsieur BRUHIER	HUESKER SYNTHETIC
Monsieur DERACHE	FRANCE GABIONS S.A.
Monsieur DUCOL	TEXINOV
Monsieur FAURE	LIRIGM, Univ. J. Fournier, Grenoble
Monsieur GARCIN	BIDIM GEOSYNTHETICS
Monsieur HERAULT	COLBOND GEOSYNTHETICS
Monsieur POULAIN	CEMAGREF Bordeaux
Monsieur REIFFSTECK	LCPC Paris
Monsieur ROBINET	SNCF - Direction de l'Equipement

La rédaction du document ainsi que la coordination du groupe de travail a été faite par :

Philippe Reiffsteck
LCPC - Division Mécanique des Sols, des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur
Section du Comportement des Sols et des Ouvrages en Géotechnique
58, bd Lefebvre 75732 PARIS cedex 15
téléphone : 01 40 43 52 73 - télécopie : 01 40 43 65 11
Mel : philippe.reiffsteck@lcpc.fr

Sommaire

I ENJEUX ET MOYENS DE LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION 7

I.1 PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ÉROSION ET DE LEUR MÉCANISME 7
I.1.1 L'ÉROSION PLUVIALE 7
I.1.2 L'ÉROSION FLUVIALE 10
I.1.3 L'ÉROSION MARITIME 11
I.1.4 L'ÉROSION ÉOLIENNE 12
I.1.5 LES ÉROSIONS ANTHROPIQUE ET ANIMALE 13
I.2 LES SOLS À RISQUES 13
I.2.1 NOTION D'ÉCHELLE 13
I.2.2 SENSIBILITÉ DES SOLS À L'ÉROSION PLUVIALE 14
I.2.3 SENSIBILITÉ DES SOLS À L'ÉROSION FLUVIALE ET LITTORALE 16
I.3 LES AGENTS DE L'ÉROSION 19
I.3.1 LA PLUIE 19
I.3.2 LA HOULE ET LES COURANTS 20
I.3.3 EAU INTERNE 24
I.3.4 LE VENT 24
I.3.5 SYNTHÈSE 25
I.4 LES OUVRAGES À RISQUES 25
I.5 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES TECHNIQUES GÉOSYNTHÉTIQUES UTILISABLES DANS LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION 27
I.5.1 SYSTÈMES DE CONFINEMENT GÉOCONTENEURS (CGC) 28
I.5.2 SYSTÈMES DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE (CGA) 29
I.5.3 NATTES DE RENFORCEMENT DU SOL D'APPORT (RSA) 31
I.5.4 GÉOSYNTHÉTIQUES DE PROTECTION DU SOL D'APPORT (PSA) 32
I.5.5 FILTRATION DU SOL SUPPORT SOUS PROTECTION (FSP) 33
I.6 RÔLES DES TECHNIQUES DANS LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION 33
I.6.1 OBJET 33
I.6.2 DÉFINITION DES FONCTIONS 34
I.7 SYNTHÈSE 35
I.7.1 LE PROCESSUS D'ÉROSION 36
I.7.2 LES TECHNIQUES ANTI-ÉROSIVES GÉOSYNTHÉTIQUES 36
I.8 MODE D'EMPLOI 37

II ÉROSION PLUVIALE 40

II.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES 40
II.1.1 STABILITÉ SOUS SOLLICITATION PLUVIALE 40
II.1.2 LES GÉOSYNTHÉTIQUES ET LE CONTRÔLE DE L'ÉROSION PLUVIALE 42
II.2 PENTES NATURELLES 42
II.2.1 PROTECTION VÉGÉTALE (VEG) 42
II.2.2 GÉOSYNTHÉTIQUES DE PROTECTION DU SOL D'APPORT (PSA) 45
II.2.3 SYSTÈME DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE PAR FASCINAGE (CGAF) 47
II.3 TALUS DE DÉBLAIS ET TALUS DE REMBLAIS 48
II.3.1 PROTECTION VÉGÉTALE (VEG) 48
II.3.2 SYSTÈMES DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE (CGA) 49
II.3.3 NATTES DE RENFORCEMENT DE LA COUCHE VÉGÉTALISABLE (RSA) 51

II.3.4 GÉOSYNTHÉTIQUES DE PROTECTION DU SOL D'APPORT (PSA) 53
II.4 FOSSÉS 54
II.4.1 SYSTÈMES DE CONFINEMENT GÉOCONTENEURS (CGC) 55
II.4.2 SYSTÈMES DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE (CGA) 56
II.4.3 NATTES DE RENFORCEMENT DE LA COUCHE VÉGÉTALISABLE (RSA) 56
II.4.4 FILTRATION DU SOL SUPPORT SOUS PROTECTION (FSP) 58
II.4.5 GÉOSYNTHÉTIQUES DE PROTECTION DU SOL D'APPORT (PSA) 59
II.5 PLATE-FORMES 59
II.5.1 PROTECTION VÉGÉTALE (VEG) 60
II.5.2 SYSTÈMES DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE (CGA) 60
II.5.3 NATTES DE PROTECTION DU SOL D'APPORT (PSA) 61

III ÉROSION FLUVIALE 62

III.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES 62
III.2 BERGES DE VOIES NAVIGABLES, DE COURS D'EAU ET DE PLANS D'EAU 62
III.2.1 FILTRATION DU SOL SUPPORT À L'ARRIÈRE D'UNE PROTECTION OU D'UN OUVRAGE DE SOUTÈNEMENT (FSP MUR) 64
III.2.2 FILTRATION DU SOL SUPPORT SOUS UNE PROTECTION (FSP COUCHE) 66
III.2.3 CONTENEUR D'UNE STRUCTURE DE PROTECTION (CGC) 69
III.2.4 SYSTÈME DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE (CGA) 73
III.2.5 NATTE DE RENFORCEMENT DU SOL D'APPORT (RSA) 74
III.3 SEUILS EN RIVIÈRES 76
III.3.1 SOLUTIONS POSSIBLES 76
III.3.2 SYSTÈME DE GONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE PAR SEUIL (CGAS) 77
III.3.3 FILTRATION SOUS UNE COUCHE DE PROTECTION (FSP) 77
III.3.4 SYSTÈME DE CONFINEMENT PAR GÉOCONTENEURS (CGC) 78
III.4 PILES DE PONTS 78
III.4.1 SOLUTIONS POSSIBLES 78
III.4.2 FILTRATION SOUS UNE PROTECTION (FSP) 79
III.4.3 SYSTÈME DE CONFINEMENT PAR GÉOCONTENEUR (CGC) 80

IV ÉROSIONS LITTORALE ET MARITIME 81

IV.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOTEXTILES 81
IV.1.1 LE CONSTAT 81
IV.1.2 LA PLAGE 82
IV.1.3 LES CAUSES 83
IV.1.4 LES SOLUTIONS OU ACTIONS 83
IV.2 RÉHABILITATION DES CORDONS ET MASSIFS DUNAIRES 86
IV.3 LES PROTECTIONS DE HAUT DE PLAGE 87
IV.3.1 RECHARGEMENT DE PLAGE (PSA ET RSA) 87
IV.3.2 ÉTABLISSEMENT D'UN TRANSIT ARTIFICIEL 87
IV.3.3 TUBE EN GÉOSYNTHÉTIQUE ET GÉOCONTENEUR (CGC) 88
IV.3.4 FILTRE DU SOL SUPPORT SOUS UNE PROTECTION (FSP) 88
IV.4 ESTRAN 90
IV.4.1 FILTRE DU SOL SUPPORT SOUS UNE PROTECTION (FSP) 91
IV.4.2 SYSTÈME DE CONFINEMENT GÉOCONTENEURS (CGC) 92
IV.4.3 SYSTÈME DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE (CGA) 94
IV.4.4 NATTES DE RENFORCEMENT DU SOL D'APPORT (RSA) 94
IV.5 EN MER 94
IV.5.1 LES HERBIERS (VEG) 94
IV.5.2 SYSTÈME DE CONFINEMENT GÉOCONTENEUR (CGC) 95
IV.5.3 FILTRE DU SOL SUPPORT SOUS UNE PROTECTION (FSP) 96

V ÉROSION ÉOLIENNE 97

V.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES 97
V.1.1 TECHNIQUE DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION ÉOLIENNE 97
V.2 DUNES, PLAGES 97
V.2.1 CONDITION DE MILIEU : 97
V.2.2 PROTECTION VÉGÉTALE (VEG) 98
V.2.3 GÉOSYNTHÉTIQUES DE PROTECTION DE LA COUCHE VÉGÉTALISABLE (PSA) 99
V.2.4 SYSTÈME DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE PAR BRISE-VENT (CGABV) 100
V.3 MONTAGNE 102
V.3.1 PROTECTION VÉGÉTALE (VEG) 103
V.3.2 SYSTÈME DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE PAR BRISE-VENT (CGABV) 103

VI ÉROSIONS ANTHROPIQUE ET ANIMALE 104

VI.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES 104
VI.2 ACCÈS AUX SITES SENSIBLES 104
VI.2.1 NATTES DE RENFORCEMENT DU SOL D'APPORT (RSA) 104
VI.2.2 SYSTÈMES DE CONFINEMENT GÉOALVÉOLAIRE (CGA) 106
VI.3 TALUS D'OUVRAGES ET REMBLAI 106
VI.3.1 GÉOSYNTHÉTIQUES DE PROTECTION DU SOL D'APPORT (PSA) 107
VI.3.2 NATTES DE RENFORCEMENT DU SOL D'APPORT (RSA) 107

VII BIBLIOGRAPHIE 109

VII.1 PUBLICATIONS 109
VII.2 NORMES 110

VIII INDEX 112

IX EXEMPLES DE SITES 117

X ANNEXES 119

X.1 MÉTHODOLOGIE D'EXPÉRIMENTATIONS 119
X.1.1 IN SITU 119
X.1.2 EN LABORATOIRE 120
X.1.3 ANALYSE DES RÉSULTATS 121
X.2 STABILITÉ DES OUVRAGES 122
X.2.1 DÉFINITION DES CHARGEMENTS 122
X.2.2 DÉFINITION DES ÉTATS LIMITES 122
X.2.3 STABILITÉ DE PENTE 123
X.2.4 STABILITÉ DES MURS POIDS : MÉTHODE DES TROIS COEFFICIENTS 124
X.2.5 PRISE EN COMPTE DES ANCRAGES 125
X.2.6 GLISSEMENTS PLANS SUR TALUS 125

AVANT-PROPOS

Il est nécessaire de mener une politique de prévention pour combattre les effets dévastateurs des catastrophes naturelles. Sont classés parmi les catastrophes naturelles, des phénomènes rapides qui sont sous les feux de l'actualité, comme les séismes, les grands glissements, les tsunamis, les inondations. Toutefois, ces différentes catastrophes sont amplifiées lorsque le sol a été soumis au phénomène plus lent et moins spectaculaire qu'est l'érosion (CCR, 1999 ; Guiton, 1998). L'érosion provoque tout autant de fortes dépenses pour la collectivité. Heureusement, il est possible de lutter efficacement contre ce phénomène à l'aide de techniques éprouvées. Ces techniques issues de la collaboration de l'industrie chimique et textile avec le métier des travaux publics se devaient d'être décrites dans un ouvrage didactique. C'est le but que s'est fixé le Comité Français des Géosynthétiques au travers de ce guide.

Les utilisateurs

Le présent document est destiné à aider les Maîtres d'Ouvrages et Maîtres d'Œuvre lorsqu'ils rencontrent des problèmes d'érosion et qu'ils cherchent une solution pratique. Ce document n'est pas destiné aux spécialistes qui trouveront par ailleurs les ouvrages techniques consacrés à l'érosion.

Les objectifs

L'objectif de ce guide est de proposer, au lecteur, les fonctions mises en œuvre par les techniques géosynthétiques répondant aux problèmes auxquels il est confronté. Ce guide a été rédigé avec les trois buts majeurs suivants :

- ➔ Éviter de passer à côté du problème,
- ➔ Pouvoir juger des enjeux,
- ➔ Savoir faire appel à des experts.

Orientation du lecteur

Pour atteindre ces objectifs, le guide est structuré de la façon suivante : une première partie assez pédagogique qui servira de référence au lecteur pour appréhender les éléments techniques développés dans le corps du guide. Cette première partie expose également les géosynthétiques concernés par la lutte contre l'érosion sous l'angle de leur fonction pour s'affranchir des spécificités trop marquées de certains produits. Le guide décrit ensuite, en cinq chapitres, les techniques géosynthétiques disponibles pour chaque type types d'érosion selon les phénomènes mis en jeu :

Chapitre 1 : Enjeux et moyens de la lutte contre l'érosion

Chapitre 2 : L'érosion pluviale

Chapitre 3 : L'érosion fluviale

Chapitre 4 : L'érosion maritime

Chapitre 5 : L'érosion éolienne

Chapitre 6 : Les érosions anthropique et animale

Pour l'ensemble de ces techniques, il est conseillé de faire au préalable une étude de faisabilité prenant en compte toutes les conditions hydrauliques et géotechniques du site. Les données présentées dans ce guide sont fournies à titre informatif et ne dégagent nullement le concepteur de ses responsabilités. L'ingénieur géotechnicien ou géologue qui est sur le point d'étudier un site particulier doit s'informer lui-même des risques par les moyens adéquats et agir en conséquence.

I ENJEUX ET MOYENS DE LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION

I.1 PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ÉROSION ET DE LEUR MÉCANISME

Avant tout, il est nécessaire de préciser la définition retenue dans le présent guide pour caractériser ce phénomène :

> "L'érosion est la déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou d'une roche sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur, hygrométrie, gel, dessiccation...). "

Cinq types d'érosion externe sont identifiables :

- l'érosion pluviale,
- l'érosion fluviale,
- l'érosion maritime,
- l'érosion éolienne et
- les érosions anthropique et animale.

Notre objectif n'est pas d'étudier l'érosion pour elle-même, mais de définir la cible visée par les techniques géosynthétiques. Le lecteur désireux de plus de renseignements pourra puiser dans la littérature abondante traitant du sujet (Hénensal, 1986 ; Hudson, 1981 ; Neboit, 1991 ; Roose, 1994).

I.1.1 L'érosion pluviale

À l'exception de périodes géologiques aux conditions extrêmes, qui ont donné naissance à des paysages bien caractéristiques, l'érosion naturelle s'équilibre avec la régénération du sol sous végétation dense et altération du substrat. Il peut cependant se produire une rupture de l'équilibre sous l'effet de facteurs anthropiques, comme par exemple l'ouverture de chantiers de terrassement (destruction de la végétation ou création de talus à forte pente).

L'érosion pluviale se caractérise par deux mécanismes distincts (figure I-1) :

- le détachement du sol sous l'effet de l'impact des gouttes ou **battance**,
- le transport par **ruissellement.**

I.1.1.1 La battance :

En percutant le sol, une goutte d'eau libère son énergie cinétique (qui est en moyenne 256 fois plus grande que celle du ruissellement (Hudson, 1981)), et il peut se produire :

- un éclatement de la goutte d'eau en petites gouttelettes qui rebondissent,
- un détachement partiel ou total des particules du sol et leur projection à une certaine distance de l'impact,
- un compactage du sol au-dessous de la pellicule remaniée.

Ceci a pour conséquences :

- ➔ le déplacement des particules vers les parties basses du relief,
- ➔ une redistribution de la porosité de surface du sol (colmatage par les fines). C'est le phénomène des "croûtes de battance",
- ➔ la pulvérisation des agrégats.

I.1.1.2 Le ruissellement :

Il dépend de l'intensité de la pluie et de la vitesse d'infiltration. Si l'intensité de la pluie dépasse la vitesse d'infiltration, le sol refuse l'excès d'eau, qui alors ruisselle. L'écoulement de l'eau exerce un effort de cisaillement sur les particules à la surface du sol. L'énergie du ruissellement dépend de la vitesse et de la masse d'eau en mouvement.

Ces deux phénomènes sont influencés par des facteurs liés :

- ➔ au climat
- ➔ aux caractéristiques intrinsèques du sol
- ➔ à la topographie
- ➔ au taux de couverture végétale (appelé pourcentage de recouvrement par les agronomes). Il est à noter qu'on parle de taux de couverture végétale car la végétation est la technique la plus courante pour modifier les caractéristiques de l'interface eau/sol. On devrait plus généralement parler de taux de couverture.

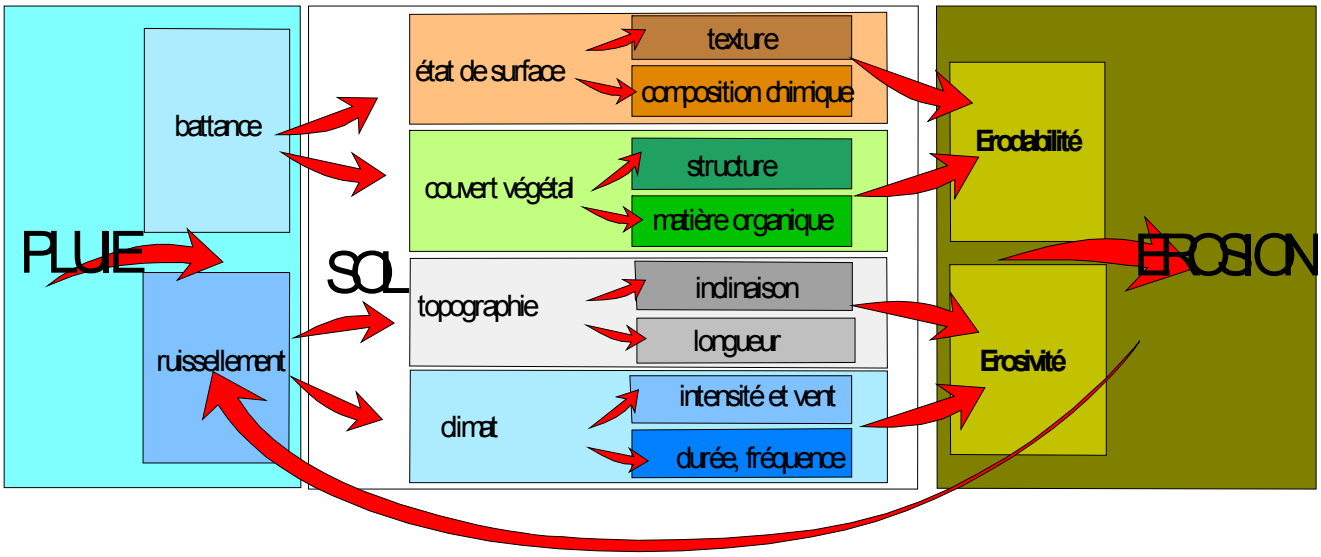


Fig. I-1 Le cycle de l'érosion pluviale

Les facteurs climatiques :

l'intensité de pluie est d'une importance capitale car directement liée au diamètre des gouttes donc à leur masse, leur vitesse et leur énergie cinétique. De plus c'est sa différence avec le taux d'infiltration qui détermine le ruissellement.

la fréquence des pluies : L'état hydrique du sol avant une pluie influe beaucoup sur son comportement. Un sol saturé avant la pluie ne sera sensible ni à l'éclatement par compression de l'air ni à la micro-fissuration. Mais le ruissellement se produira beaucoup plus vite.

le vent augmente la vitesse des gouttes.

la hauteur et la durée des pluies jouent surtout un rôle au travers de leur rapport comme nous l'avons vu plus haut.

Les facteurs intrinsèques du sol *:*

la structure : les différentes structures sont plus ou moins sensibles à l'érosion. Si on les classe en allant vers une sensibilité croissante, on obtient : structure grumeleuse - finement polyédrique - polyédrique moyenne à grossière - en bloc, feuilletée ou massive.

la granulométrie : les sols les plus sensibles à l'érosion sont les sables fins et les silts. En effet, pour ces sols, les particules de faible masse sont aisément transportées par le ruissellement.

la teneur en matière organique : la matière organique joue le rôle de ciment pour les agrégats du sol. Il faut noter l'effet de synergie à ce niveau entre l'argile et la matière organique.

la composition chimique : l'influence de la composition chimique du sol et également de l'eau de ruissellement a été mise en évidence. Ainsi le carbonate de calcium fait floculer les argiles et augmente la cohésion du sol. Le sodium, lui, les disperse et diminue donc la cohésion du sol. Les oxydes de fer et d'aluminium jouent le rôle de ciment pour les agrégats.

l'infiltrabilité : c'est la différence entre l'intensité et la vitesse d'infiltration qui détermine le ruissellement.

l'état de la surface du sol : la formation d'une croûte sous l'effet de la battance diminue l'infiltration. La rugosité de la surface diminue la vitesse du ruissellement mais les irrégularités peuvent créer des passages privilégiés qui seront autant d'amorces de ravines.

Les facteurs topographiques :

l'inclinaison : les transports de sol croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente.

la longueur de la pente : En principe, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie. Mais en raison des irrégularités du terrain ceci n'est pas toujours vérifié dans la réalité.

la forme de la pente : Les pentes concaves sont moins sensibles à l'érosion que les pentes convexes.

Les facteurs liés au couvert végétal :

le pourcentage de recouvrement : plus il est important plus l'impact des gouttes est amorti sur une grande surface.

l'architecture des végétaux : selon l'architecture du couvert arboré, il peut y avoir concentration ou dispersion des gouttes, fragmentation ou rassemblement du ruissellement. Selon l'organisation des racines, l'infiltration peut-être plus ou moins favorisée et la fixation du sol plus ou moins assurée. La végétation joue aussi un rôle en diminuant le coefficient de ruissellement par l'évaporation qu'elle provoque et le stocke d'eau qu'elle représente. Par son apport de matière organique, elle améliore la cohésion du sol.

Les techniques de lutte contre l'érosion pluviale doivent s'attacher à améliorer ou modifier ces éléments pour limiter l'action de l'eau (battance et ruissellement).

I.1.2 L'érosion fluviale

Les problèmes d'érosion fluviale concernent à la fois, avec des sollicitations sensiblement différentes, les voies navigables et les cours d'eau naturels, ainsi que les plans d'eau (figure I-2).

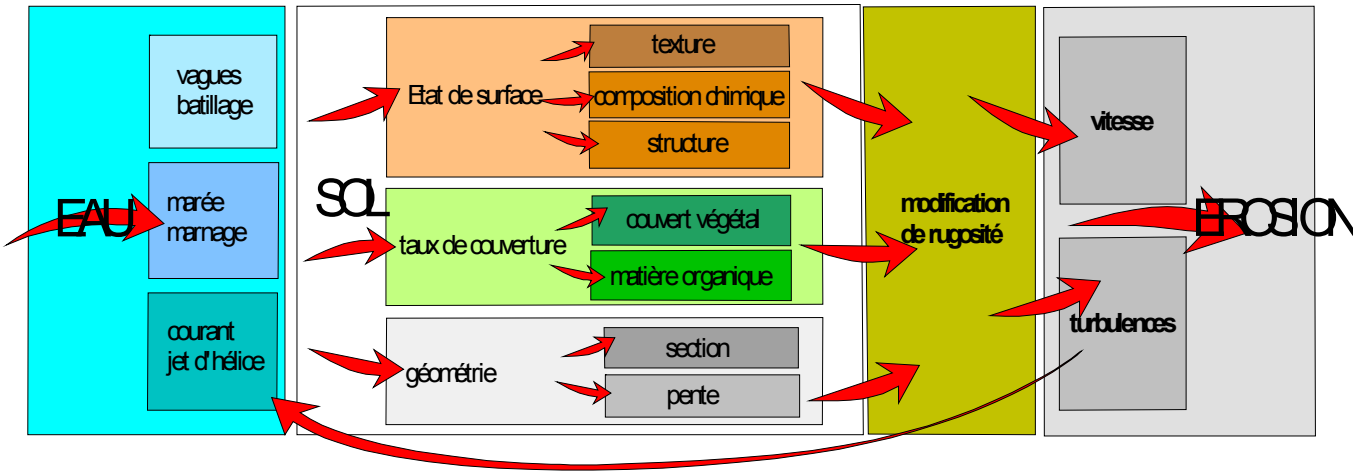


Fig. I-2 Le cycle de l'érosion fluviale et maritime

Dans le cas des cours d'eau naturels, l'érosion des berges est due :

- ➔ au courant naturel,
- ➔ aux variations de niveau d'eau (crue-décrue),
- ➔ aux vagues de vent,
- ➔ à des interventions humaines (dragage, calibrage, endigage, rescindement de méandre…).

La présence de points singuliers (courbes des rivières, piles et culée de ponts, seuils et barrage, ...) est susceptible d'accentuer ces phénomènes.

Dans le cas des voies navigables, la circulation des bateaux à travers les phénomènes :

- ➔ d'abaissement instantané du plan d'eau,
- ➔ de création de vagues,
- ➔ de création d'un courant de retour.

sollicite principalement les berges dans des zones localisées de part et d'autre du plan d'eau.

Dans le cas des cours d'eau navigués, les phénomènes se superposent.

Sur les plans d'eau, qu'il s'agisse de retenues artificielles, de lacs ou d'étangs, l'érosion est essentiellement due :

- ➔ au marnage,
- ➔ aux vagues de vent,
- ➔ au batillage généré par la pratique des sports nautiques motorisés.

Les techniques de lutte contre l'érosion fluviale doivent s'attacher à améliorer ou modifier ces éléments pour limiter l'action de l'eau.

Le choix d'un type de protection de berges est en premier lieu conditionné par la fonction à remplir par le dispositif et l'intensité des sollicitations développées plus avant. On retient habituellement trois principales fonctions :

- ➔ protection contre l'érosion et soutènement,
- ➔ protection contre l'érosion et étanchéité,
- ➔ protection contre l'érosion uniquement.

Pour assurer ces fonctions, il existe une multitude de systèmes à base de rideaux de palplanches, d'enrochements libres ou liaisonnés, de blocs de béton, de matelas de gabions métalliques ou polymères, de systèmes bitumineux, de conteneurs textiles,... remplissant tout ou partie des différentes fonctions.

I.1.3 L'érosion maritime

L'érosion maritime concerne le littoral naturel et aménagé. Dans ce guide, les ouvrages d'aménagement portuaire (digues, quais, terre-pleins,...) ne sont pas traités, le lecteur étant invité à consulter la littérature propre à l'ingénierie maritime et à se rapprocher de spécialistes de ce domaine.
Son attention est toutefois attirée sur l'interaction forte qui existe entre les ouvrages portuaires et les parties de littoral naturel qui les entourent ; ainsi que sur la nécessité d'intégrer les composantes spatiale et temporelle de l'érosion dans l'étude et la conception de ces ouvrages. En plus de la détermination des sollicitations hydrodynamiques et des reconnaissances géotechniques, elles nécessitent notamment la réalisation de levers bathymétriques et topographiques généraux et de détail saisonniers des petits fonds et de l'estran ; voire la réalisation d'études spécifiques sur modèles numériques ou physiques. La conception des ouvrages intègre généralement la mise en place de dispositifs anti-affouillement.

Le littoral que nous considérerons est donc un milieu naturel, éventuellement protégé, assurant la transition entre des espaces terrestres et marins.

Cette particularité fait que les facteurs naturels de l'érosion du littoral sont principalement les actions d'origines continentale et marine, et accessoirement les actions chimiques et biologiques. S'y ajoutent le cas échéant les effets des interventions ou actions humaines.

De manière générale, les principaux points à considérer sont :

I.1.3.1 Les actions continentales ou météoriques

Ces actions sont surtout effectives sur les littoraux constitués de falaises de roches meubles ou de sols sableux. Elles déplacent les matériaux ou modifient leurs caractéristiques physiques ou géotechniques.

les apports fluviaux : Les fleuves côtiers alimentent par leurs débits solides le littoral en sédiments, principalement lors des crues. Ces apports solides influent sur le transport littoral et conditionnent la position des embouchures.

les eaux de ruissellement : Leur rôle est particulièrement important dans les formations sensibles à l'eau, telles les argiles et les sables fins. Des apports concentrés au niveau d'exutoires pluviaux ou de dispositifs de drainage sous-dimensionnés ou inadaptés contribuent à une augmentation des pressions interstitielles défavorables à la stabilité des ouvrages de protection contre l'érosion.

les eaux d'infiltration : L'écoulement des eaux d'infiltration favorise l'élargissement des fissures qu'elles parcourent et concourent à une augmentation de la piézométrie.

les effets thermiques : Seuls ou conjugués à des phénomènes de ruissellement ou d'infiltration, le gel, la chaleur, l'alternance de phases climatiques sèches et humides modifient le comportement de certaines roches tendres, fissurées ou poreuses (argiles, marnes, calcaires,...). Il en résulte des gonflements ou des éclatements de ces matériaux qui deviennent d'autant moins résistants à l'action des facteurs érosifs.

le vent : L'importance des formations dunaires sur le littoral souligne le rôle du vent dans les transports de matériaux sableux (voir les parties sur l'érosion éolienne). Le vent transporte le

sable sur l'estran et déplace ou bâtit les dunes. Il peut également pousser le sable à la mer ou dans les lagunes.

I.1.3.2 Les actions marines

l'action des vagues : Les vagues de houle sont l'agent d'érosion le plus important. Sur le littoral meuble, elles provoquent un remaniement constant des fonds et du rivage en générant des mouvements des sédiments perpendiculaires au rivage (mouvements dans le profil de plage) et des mouvements sensiblement parallèles à celui-ci (transit littoral). Sur les côtes à falaises, elles provoquent la désagrégation des roches par des chocs mécaniques et dispersent les éboulis qui assuraient la protection des pieds de falaises.

l'action des courants : Les courants, principalement ceux de houle et avec importance moindre les courants généraux ont surtout une action sur les petits fonds et sur l'estran. Ils déplacent les matériaux par charriage ou saltation.

les variations du niveau marin : Qu'elles soient liées à la marée ou à des phénomènes venteux persistants ou dépressionnaires marqués, les variations de niveau déplacent et étendent la zone d'action des houles, des courants et du vent. Elles modifient alors les paramètres et conditions de dimensionnent des ouvrages. Elles génèrent des phénomènes de circulation interne d'eau dans l'estran et à l'arrière des ouvrages de protection. Elles accentuent lors des tempêtes les risques littoraux d'érosion, de submersion et de choc mécanique sur les terrains, bâtiments et infrastructures proches du rivage.

I.1.3.3 Les actions chimiques

Elles sont essentiellement des phénomènes de dissolution dans les roches calcaires dues aux eaux atmosphériques (sur les falaises) et marines (sur les platiers).

I.1.3.4 Les actions biologiques

Elles sont dues aux actions des végétaux (surtout les algues) et des animaux (patelles, balanes, pholades). Les actions biologiques sont les plus importantes sur le platier rocheux.

Les techniques de lutte contre l'érosion maritime doivent s'attacher à connaître, déplacer ou modifier ces éléments pour limiter leurs actions.

I.1.4 L'érosion éolienne

Parmi les différents processus érosifs, l'érosion éolienne est à la fois très répandue mais aussi assez méconnue. A l'interface terre/atmosphère, les mécanismes de l'érosion éolienne sont plus difficiles à identifier que ceux de l'érosion hydrique.

Les deux principaux effets de l'érosion éolienne sont la **déflation** entraînant mobilisation et déplacement des particules et l'abrasion à partir des matériaux transportés (**corrasion**). L'érosion éolienne est fonction de l'opposition de deux forces: le vent et la résistance du sol. L'érodabilité des sols dépend principalement de leur stabilité mécanique (figure I-3).

Les sols répondent différemment à l'énergie cinétique qui leur est appliquée. Il est indispensable de connaître leur état de surface car on y trouve à la fois des éléments non érodables et des particules mobilisables par le vent. L'absorption d'une partie de l'énergie du vent par des obstacles non érodables est sans doute une composante majeure de la dynamique de l'érosion éolienne.

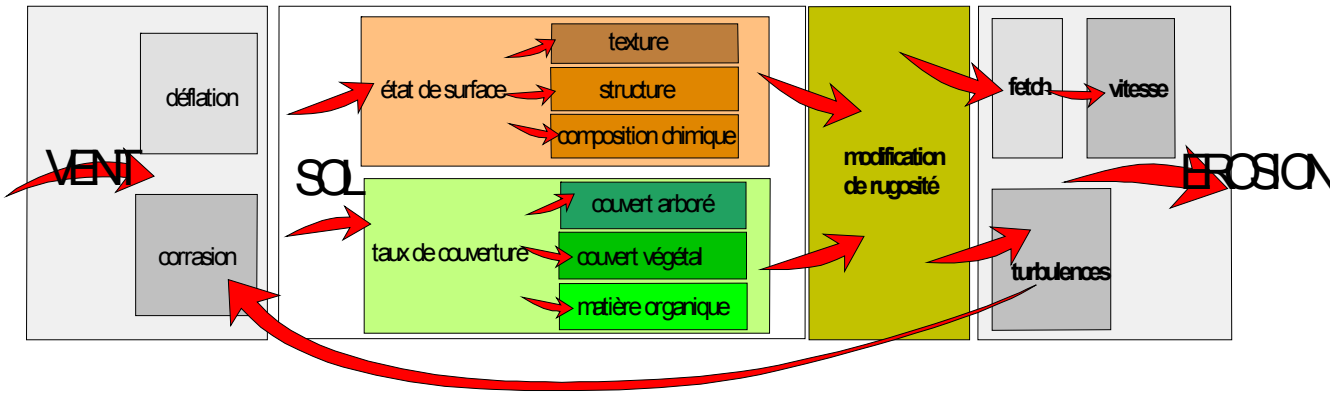


Fig. I-3 Le cycle de l'érosion éolienne

Les éléments non-érodables absorbent une partie de l'énergie éolienne et il en résulte une protection relative de la surface érodable. La lutte contre l'érosion reproduira cette fonction d'éléments non érodables.

Pour l'état de surface, trois facteurs sont influents :

- la texture du sol proprement dit (granulométrie, compacité, teneur en eau,...),
- sa composition chimique,
- la structure de l'ouvrage (géométrie).

Pour le taux de couverture végétale, trois éléments ont été également définis :

- la teneur en matière organique,
- le couvert herbacé,
- le couvert arboré.

Les techniques de lutte contre l'érosion éolienne doivent s'attacher à renforcer ou compléter ces éléments pour limiter l'action du vent (déflation et corrasion).

I.1.5 Les érosions anthropique et animale

La prise de conscience de l'existence d'une érosion anthropique est issue de la création de zone de protection de la flore et de la faune (comme les parcs naturels nationaux ou régionaux ou les « Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique » (ou ZNIEFF) découlant du programme de la communauté européenne « Natura2000 ») vis-à-vis des agressions générées par l'homme ou par les animaux domestiques. De toutes les formes d'érosion, l'érosion anthropique est celle qui peut le moins se mettre en équation. Elle est due au piétinement humain ou animale, au freinage ou au démarrage de véhicule à propulsion humaine ou mécanique à deux roues ou quatre roues.

Ce que l'on qualifiera d'érosion animale est une agression des animaux sauvages envers un ouvrage technique a contrario de l'érosion anthropique dirigée vers la nature. Les ouvrages concernés peuvent être les talus de remblai ou déblais jouxtant des ouvrages comme les pistes d'aéroport, les voies ferrées ou des ouvrages à part entière comme les digues et les barrages.

I.2 LES SOLS À RISQUES [1]

On entendra par « sol », les sols au sens des pédologues et les formations géologiques, ainsi que leurs diverses formes de mises en œuvre (déblais, remblais,...). On pourra réunir ici ces deux notions sous l'appellation de « substrat ».

I.2.1 Notion d'échelle

Pour une pente (talus, berge, côte) on est confronté à deux problèmes de stabilité :

- Le premier est relatif à la stabilisation d'une épaisseur significative de sol (plusieurs centimètres) sur pente forte. Cette couche de sol est une couche de terre végétale ou de sol

[1] On ne décrira pas dans ce document les techniques à mettre en œuvre pour lutter contre l'érosion dans les terrains agricoles (vergers, vignobles). Toutefois celles-ci présentent de nombreuses similitudes et la démarche est commune.

relativement pulvérulent. Nous définirons ce problème comme un problème de **meso-stabilité** pour le distinguer de la **macro-stabilité** qui concerne la stabilité globale.

➔ Le second problème est relatif à la stabilité des grains de sol en surface. Nous parlerons alors de **micro-stabilité.** Alors que la meso-stabilité est liée à des forces gravitaires statiques, la micro-stabilité est corrélable aux sollicitations correspondant par exemple dans le cas de l'érosion pluviale, l'effet d'impact et l'effet du ruissellement.

Cette micro stabilité est directement liée à la nature du sol.

I.2.2 Sensibilité des sols à l'érosion pluviale

Les sols pédologiques, comme les formations géologiques, sont plus ou moins sensibles à l'érosion pluviale en fonction de la quantité d'argiles, la cohésion, l'induration,... (figure I-4)

Ainsi, les substrats sableux sont très sensibles à tous les mécanismes d'érosion et sont particulièrement difficiles à végétaliser, notamment car ils présentent une faible capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs.

Les substrats marneux ou argileux sont eux aussi sensibles à l'érosion qu'elle soit pluviale, fluviale ou maritime, avec des risques de glissements en masse. Le risque augmente pour les marnes gypseuses car il y a alors possibilité de dissolution des niveaux de gypse (Meurthe et Moselle, Alsace : les marnes du Keuper). En outre, en période sèche, ces substrats sont souvent très durs et se dessèchent en profondeur suite à l'ouverture de fentes de retrait. Lors de la ré-imbibition, ces fentes se remplissent d'eau.

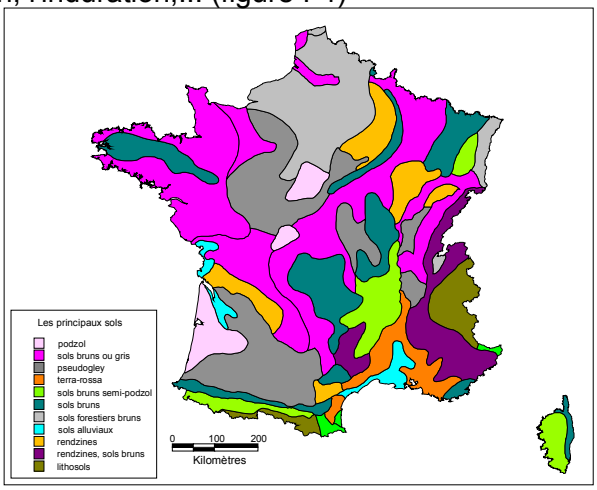


Fig. I-4 Carte pédologique simplifiée

La mise en charge de ces fractures peut entraîner des problèmes graves de stabilité globale des pentes et talus. En période sèche, il ne faut pas non plus négliger l'action du vent qui entraîne les fines particules d'argile.

De manière générale, les substrats ayant un fort taux d'argile (argilites, marnes, schistes, alluvions,...) ou une faible cohésion (sable, conglomérats peu consolidés, éboulis,...) seront les plus sensibles à l'érosion superficielle. Pour les substrats argileux, cette sensibilité est liée à la formation d'une croûte de battance, à l'écoulement en nappe sur cette surface imperméabilisée, à la possibilité d'érosion régressive, à la formation de fentes de retraits,... Pour les substrats à faible cohésion, la sensibilité est liée à l'absence de tenue du matériau, les grains étant libres entre eux.

A l'opposé, on trouvera l'ensemble des substrats rocheux d'origine magmatiques ou métamorphiques, tel que les gneiss, les granites, les basaltes, les gabbros, les micaschistes,... Ces matériaux peuvent être mis en œuvre même sous des pentes fortes. Il faut se méfier quand même des risques d'éboulement liés à un phénomène érosif, tel que la gélifraction ou la dilatation thermique des minéraux sombres.

Pour les roches calcaires, il existe tous les intermédiaires possibles depuis les marbres métamorphiques jusqu'aux calcaires marneux en passant par les craies...

L'aménageur ne devra pas non plus négliger le facteur structure du substrat. C'est le cas des schistes par exemple. Si les feuillets sont parallèles au vecteur érosion le risque sera très supérieur que s'ils lui sont perpendiculaires. Et un sol pédologique bien structuré résistera mieux que de la terre végétale rapportée.

On pourra encore estimer la résistance en fonction de la nature du ciment qui lie les grains (les grès, les alluvions, les molasses, les conglomérats,...). Par exemple, les grès à ciment siliceux sont presque inaltérables, tandis que les grès à ciment calcaire pourront être dissous plus facilement.

Enfin, un substrat aura des comportements très différents en fonction du climat (alternance gel/dégel, période d'ensoleillement, événement orageux, ...).

Ces corrélations entre la nature géologique du substrat et la sensibilité à l'érosion permettent de délimiter des zones de plus ou moins forte sensibilité. Les sols sont répertoriés sous forme de cartes pédologiques dont l'objectif est d'établir les lois de répartition des sols sur la base de leurs facteurs

de formations que sont le matériau géologique, la géomorphologie, le climat, la végétation et les actions anthropiques. Cependant cette classification pédologique, si elle permet de définir le sol en fonction de sa texture et de la roche dont il est issu, souffre de sa nature que l'on peut qualifier d'encyclopédique. Le classement des sols est purement qualitatif et peu corrélé avec des indicateurs plus quantitatifs, nécessaires pour évaluer l'aléa.

Il est possible d'utiliser pour cela des cartes issues des analyses pédologiques sur lesquelles sont données les répartitions du pH et de la texture des sols de surface. Ces informations peuvent provenir de deux sources principales (INRA, 1999 ; INRA AFES, 1999). Une vision synthétique des variations granulométriques est fournie par la cartographie des textures, estimées à partir des fractions granulométriques analysées par sédimentation, selon le triangle GEPPA simplifié (voir lexique et Baize, 1988). La cartographie des fractions granulométriques montre l'existence de tendances de grande portée qui sont à relier aux structures géologiques, géomorphologiques (extension des limons éoliens) ou à des processus pédogénétiques. En effet, cette carte présente de très grandes analogies avec la carte pédologique au 1/1.000.000 de France.

Des tentatives de cartographie de l'aléa érosion pluviale des sols sur la France entière ont été menées par l'INRA (service de la carte pédologique) sous l'impulsion du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement et par l'IFEN (figure I-5). Cette démarche a été effectuée en suivant une méthodologie de combinaison dans un SIG de données pédologiques, météorologique, topographique et d'occupation des sols, inspirée ou (développée) lors de l'établissement des PPR.

Fig. I-5 Carte de l'aléa érosion (Ifen, 1998)

La visualisation simultanée des cartes de l'aléa par saison issues de cette étude met bien en évidence la variabilité saisonnière de l'aléa " érosion "mais aussi l'existence de régions systématiquement concernées. On distingue en particulier :

- les régions fortement touchées par l'aléa " érosion des sols " en toutes saisons (le nord, l'est du Bassin parisien, la vallée du Rhône, le sud-ouest),
- les régions modérément touchées, ou pour lesquelles l'aléa " érosion " existe pour certaines saisons seulement (le pourtour méditerranéen, le Poitou-Charentes et la Bretagne),
- les régions qui ne sont pratiquement pas concernées par l'aléa " érosion " (par exemple l'Auvergne, les Landes).

Toutefois, les résultats de ce type de démarche ne peuvent être interprétés localement à l'échelle d'un talus d'ouvrage.

Orientée vers l'évaluation de l'aléa érosion sous l'angle de l'agriculture (grandes cultures, vignobles et vergers…) cette synthèse a l'avantage de resituer la problématique à différentes échelles (IFEN, 1998).

Sous l'angle de l'ingénierie géotechnique on peut retenir, à titre d'ordre de grandeur, les paramètres suivants :

Tableau I-1 Paramètres usuels des sols

	granulométrie	cohésion	Angle de frottement interne	Module d'Young	perméabilité	vitesses critiques d'érosion sur sol humide (Hudson, 1981)	
						du sol nu	du sol engazonné
argile compacte	d<2μm	15 à 25 kPa	20 à 25 °	7 à 18 MPa	$<10^{-9}$ m/s	1,20 m/s	2,5 m/s
silt	2μm <d<0,02mm	0	34°	7 à 18 MPa	$<10^{-7}$ m/s	0,60 m/s	1,5 m/s
sable fin	0,02mm<d<0,2mm	0	30 à 40°	7 à 20 MPa	$\sim10^{-5}$ m/s	0,30m/s	0,3 m/s
sable grossier	0,2mm<d<2mm	0	30 à 38°	10 à 25 MPa	$1.\ 10^{-5}$ m/s à $1.\ 10^{-4}$ m/s	0,45 m/s	1,7 m/s
gravier	2mm<d<20mm	0	40°	50 à 100 MPa	$1.\ 10^{-3}$ m/s à 0,1 m/s	0,70 m/s	-
cailloux	20mm<d<200mm	0	45°	100 à 200 MPa	$1.\ 10^{-2}$ m/s à 1 m/s	1,20 m/s	-
enrochement	200mm<d	0	>45°	100 à 200 MPa	>0,10 m/s	>1,20 m/s	-

Tableau indicatif
Tout projet doit comporter une étude géotechnique qui définira exactement ces valeurs caractéristiques

Les valeurs à affecter à ces paramètres ne sont pas identiques selon que le sol est saturé ou non.

On signalera qu'il a été développé par le passé de nombreux appareils permettant de produire une érosion artificielle. On peut les ranger en deux catégories : les appareils de type rotatif (à tambour ou semblable à une cellule triaxiale par exemple) et, plus connus les appareils de type gravitaire (simulateurs de pluie). Les premiers ont été developpés en France au LCPC (Hénensal et al., 1990) et les derniers existent au LIRIGM de Grenoble ou au CEMAGREF d'Antony (Warlouzel, 1999). Une description plus détaillée de ces dispositifs figure en annexe.

Des travaux menés au LCPC dans les années 90, par Hénensal, pour corréler l'érodabilité des sols en fonction de paramètres plus quantitatifs tels que la valeur au bleu, l'activité, la texture et la pente, ont conduit au développement d'un appareil spécifique (Hénensal et al., 1990) de type rotatif appelé « érodimètre ».

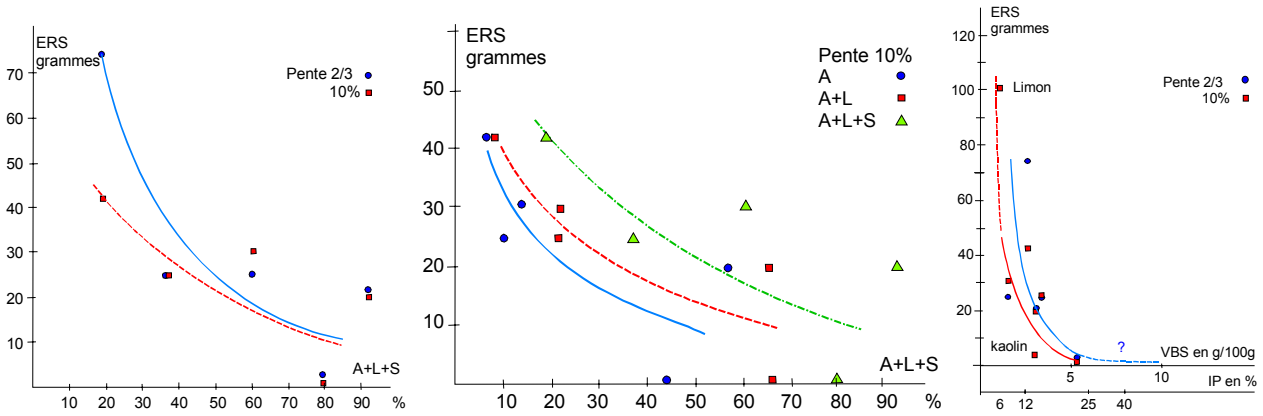


Fig. I-6 variation de l'érodabilité en fonction l'indice de plasticité, la valeur au bleu et la pente (Henensal et al., 1994)

Ces travaux ont montré des perspectives intéressantes mais n'ont pas à l'heure actuelle abouti (figure I-6).

I.2.3 Sensibilité des sols à l'érosion fluviale et littorale

La sensibilité des sols aux mécanismes d'érosion présentés aux paragraphes I.1.2 et I.1.3 est un peu différente de celle décrite en tête de chapitre même si elle s'apparente beaucoup au niveau des

particules à celle due au ruissellement. On peut dissocier l'érosion par les flux hydriques en trois domaines :

I.2.3.1 Domaine fluvial

En domaine fluviatile, les flux d'éléments dissous, et les flux sédimentaires dépendent des bassins versants. Les transferts d'éléments (par exemple fins ou dissous) sont en relation avec les reliefs et la composition lithologique du bassin versant (par exemple roches granitique ou carbonatée). En effet, l'érosion dans le lit d'une rivière au profil longitudinal irrégulier, synonyme d'un bassin versant récent, sera plus importante que lorsque les pentes topographiques sont faibles, c'est-à-dire au profil régulier, cas d'un bassin arrivé à un stade de maturité avancé (figure I-7).

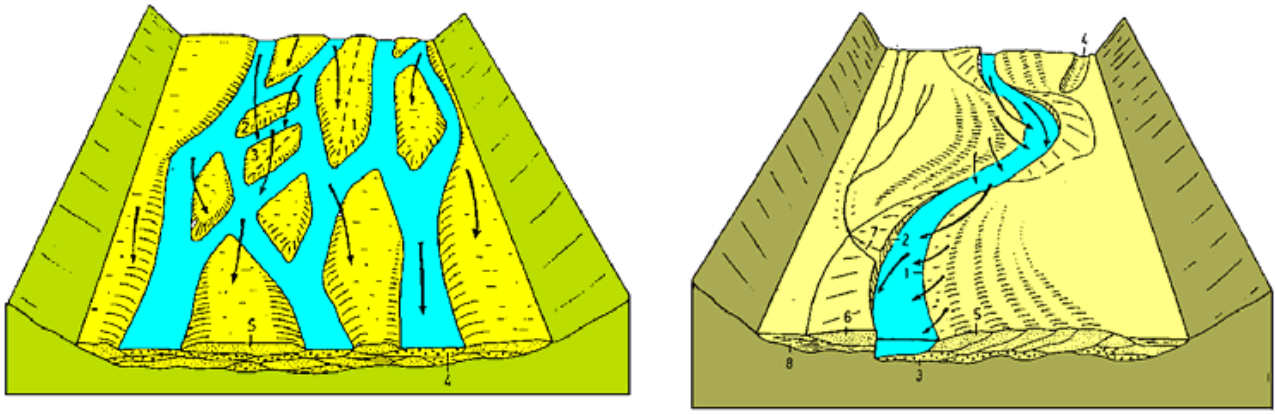


Fig. I-7 Mécanisme de l'érosion fluviale

Comme pour le ruissellement, les éléments les plus fins sont les premiers à être érodés (figure I-8). Cela, bien sûr, est à pondérer par la présence ou non de cohésion entre les particules. Lorsque le flux s'accroît, l'érosion devient maximale, et transporte des blocs de toutes tailles. Au débouché dans la vallée, le ralentissement soudain de la pente oblige au dépôt immédiat des éléments les plus lourds, l'équilibre charge/débit étant rompu en faveur de celle-là.

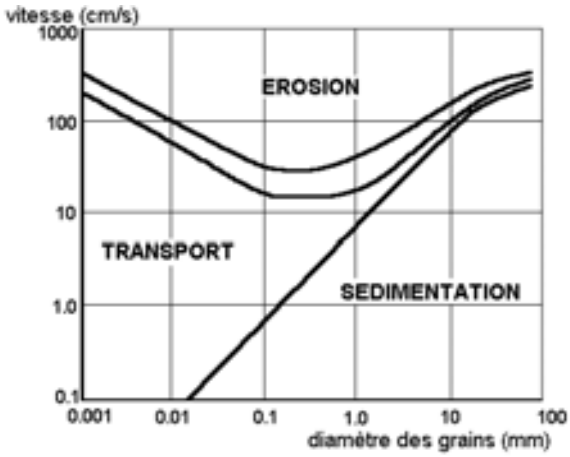


Fig. I-8 vitesse critique d'entraînement

Pour Livingstone (cité par Pomerol, Lagabrielle et Renard, 2000), la quantité de substances dissoutes transportées en moyenne par les fleuves est de $3{,}9.10^9$ tonnes par an, soit 10 $m^3/km^2/an$. Analysant la Seine à Paris, Pouquet (1961) affirme qu'elle transporte 25 $m^3/km^2/an$, soit un apport total de 10^2 m^3 par an.

I.2.3.2 Estuaires et embouchures

A l'interface continent-océan, l'évolution de la bordure de l'estuaire est une alternance d'érosion et de progradation, en relation avec les courants marins et le débit solide du fleuve. On notera que la présence d'ouvrage sur les fleuves a provoqué une diminition de la charge solide qui alimentait le littoral en sédiments. L'étude des mécanismes de floculation et sédimentation dans les estuaires dépend de la nature de la charge solide (argileuse ou sableuse, fine ou grossière) et de l'hydrodynamisme. Les agrégats se forment et sédimentent dans un milieu où l'hydrodynamique est régie par les vitesses (et le sens de courant) des eaux continentales et de mer et par des effets de densité des eaux. Le sel (en inversant la charge de la couche diffuse des colloïdes présents au sein des agrégats) a pour effet de restabiliser les gros agrégats en les cassant en agrégats de plus petite taille. Outre l'effet du sel, l'accélération de l'eau douce au dessus de la couche d'eau de mer (V = 4 m/s) crée des forces de cisaillement susceptibles de casser les agrégats. Deux effets jouent un rôle important :

(i) la vitesse de dilution eau douce/eau de mer. Plus la vitesse de dilution est faible (~vitesse lente d'augmentation de salinité) plus la formation d'agrégats > 25µm se fait à faible salinité.

(ii) la masse de particules. Les cinétiques d'agrégation augmentent avec le nombre de particules initiales.

Le triage des particules fines est très rapide, il s'effectue immédiatement à l'embouchure du fleuve ; les particules grossières se déposent rapidement alors que les éléments les plus fins sont entraînés vers le large, on ne les retrouve pas sur les plages, où l'on rencontre par contre les sables moyens (entre 160 et 315 µm). Les sables les plus grossiers ont tendance à rester autour de l'embouchure (400 µm sur la barre d'embouchure). Les sédiments, avant d'être redistribués le long de la côte, sont dans un premier temps stockés dans les barres (ou rides littorales) avant d'évoluer en they ou en cordon littoraux.

I.2.3.3 Linéaire cotier

L'érosion du trait de côte est due à l'action conjuguée des vagues et des courants (marée et courants marins). Les énergies mises en jeu, par exemple, lors des grandes marées et des tempêtes, sont énormes. L'évolution du littoral constitué de sédiments fins est un équilibre entre une érosion continuelle contrebalancée par l'accrétion (recharge sédimentaire). En effet, le déferlement des vagues sur les fonds de faible profondeur se traduit par le transfert de sédiments ou charriage vers la côte (figure I-9). Les courants de retour sont capables, lorsqu'ils se superposent aux courants de houle (houle de terre), d'entraîner les sédiments vers le large. Les variations climatiques saisonnières permettent de distinguer les vagues oscillantes d'été favorisant l'accumulation sédimentaire sur le bourrelet de plage, qui lui-même, sous l'action des vents de mer, tend à redistribuer le matériel sur l'arrière plage et les vagues d'hiver. En hiver, l'énergie plus importante des vagues et l'importance des tempêtes entraîneraient le sable de la plage aérienne vers la plage sous-marine.
Les courants dus à la houle, se combinent aux courants de retour (rip-currents), correspondant au reflux de l'eau venue à la côte dans le jet de rive (voir I.3.2), provoquant ainsi un transport par dérive littorale. Du fait de la dérive littorale, apparaissent des formes d'accumulation (flèches et barres) créées par ce transport de sable et de gravier érodés.
Sur les profils de plage on rencontre les sables les plus grossiers à hauteur du déferlement des vagues, c'est à dire au niveau du talus prélittoral. De part et d'autre, la granulométrie des sables s'affine.

L'évolution longitudinale des caractères granulométriques des sables est largement tributaire des variations longitudinales des dynamiques littorales. L'orientation et la vitesse de la dérive littorale, donc des houles et du trait de côte, jouent un rôle primordial dans la répartition des secteurs en érosion et en accrétion. Les variations de l'énergie des vagues ou du taux de transport des sables le long de la côte isolent des secteurs qui fonctionnent en cellule hydro-sédimentaires. Celles-ci peuvent être identifiées grâce à la signature granulométrique des sables qui les composent ; ils sont plus grossiers dans les secteurs qui réceptionnent les sédiments ou dans les zones en érosion, et plus fins dans les zones sources ou les secteurs progradants.

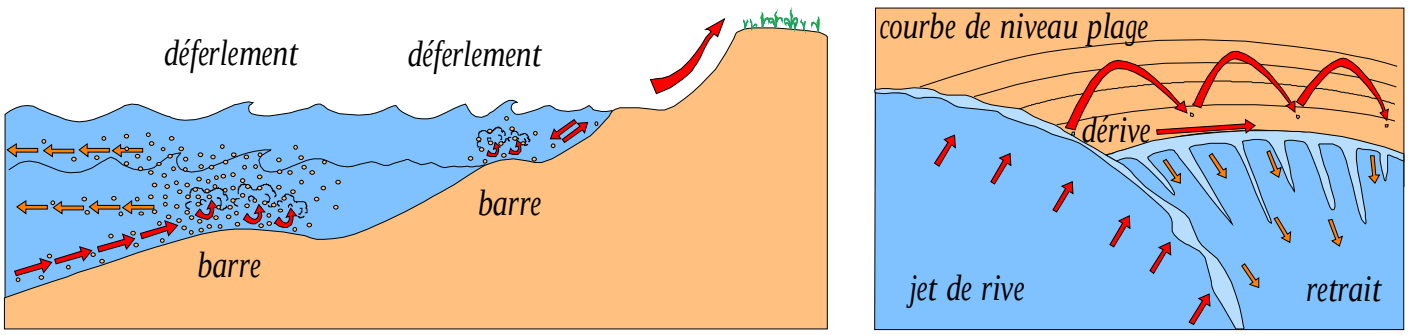


Fig. I-9 mécanisme de l'érosion littorale

Les courants généraux, liés à la circulation générale dans les golfes de l'océan Atlantique et le bassin occidental de la Méditerranée, intéressent rarement le transport sédimentaire près du rivage.

Lorsque le littoral est surtout composé de falaises, l'érosion est causée par le ravinage, le creusage de niches par les vagues, le déclenchement de coulées peu profondes, de ruptures de blocs et de glissements régressifs. Il convient de distinguer les falaises plongeantes sur lesquelles les vagues sont réfléchies sans libérer leur énergie et les falaises, précédées d'une plate-forme rocheuse, au pied desquelles les vagues déferlent ; celles qui, constituées de roches dures, résistent bien à l'attaque des vagues et celles qui sont faites de roches tendres facilement érodables ; celles qui reculent par éboulements après avoir été mises en porte-à-faux par l'entaille d'une encoche basale d'érosion mécanique des vagues et celles qui évoluent par des glissements provoqués par l'infiltration des eaux de pluie. Elles sont d'autant plus vulnérables que, par suite d'actions humaines (extractions, perturbation des courants côtiers par des installations portuaires), les accumulations naturelles de galets qui, dans une certaine mesure, protégeaient leur pied de l'attaque des vagues ont beaucoup perdu de leur substance.

I.3 LES AGENTS DE L'ÉROSION

Les substrats naturels présentent des risques d'érosion qui, selon les agents de l'érosion peuvent s'amplifier.

I.3.1 La pluie

Les fortes pluies déstructurent superficiellement le substrat, puis éliminent par ruissellement les particules arrachées, ravinent le terrain,...

I.3.1.1 Le splash, la battance et le ruissellement

Les gouttes de pluie brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées (figure I-10). Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou «splash», déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface. Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment les pores : la surface du sol perd de sa capacité d'infiltration et sur certains sols, il apparaît un litage qui lors de la dessiccation provoque une croûte de battance. La terre est dite « glacée ». L'eau ruisselle alors sur le sol sous forme d'une lame d'eau, de filets diffus ou d'un écoulement concentré.

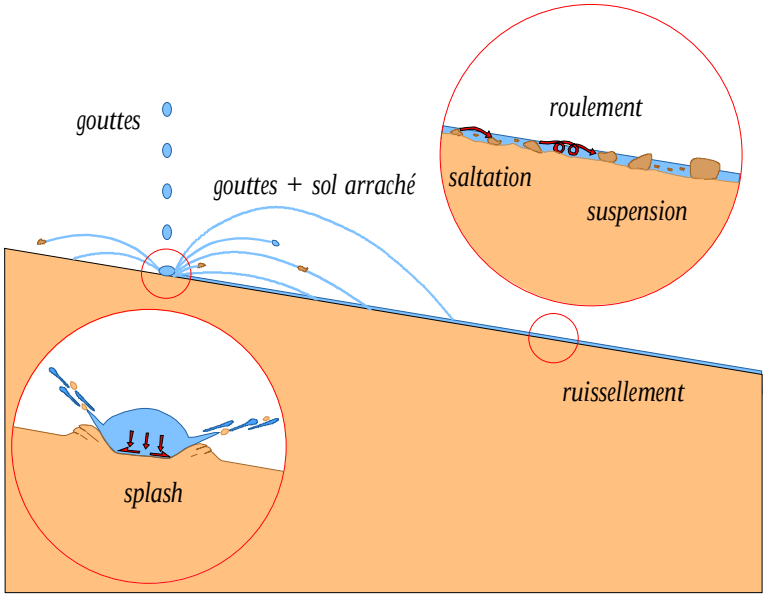


Fig. I-10 Le mécanisme de l'érosion pluviale

Elle exerce sur le sol une force de cisaillement qui arrache les particules puis les transporte. Les conditions d'arrachement, de transport et finalement de dépôt dépendent de la vitesse du courant et de la taille des particules. Il existe ainsi pour un sol donné une vitesse critique d'arrachement et une vitesse limite au-dessous de laquelle les particules sédimentent (figure I-8). L'érosion se fait en nappe (érosion aréolaire) dans le cas de ruissellement diffus ; l'arrachement des particules est sélectif, il est produit par le splash sur l'ensemble de la surface, le transport est faible et le dépôt proche sous forme de colluvionnement.

L'érosion en rigoles apparaît lorsque le ruissellement se concentre et acquiert un pouvoir d'arrachement suffisant pour mobiliser localement l'ensemble des particules. Il se forme d'abord de simples griffures, puis des rigoles décimétriques qui peuvent évoluer en ravines métriques.

Le ruissellement peut être estimé en observant les principaux facteurs qui influent sur le partage de la pluie en infiltration et ruissellement :

- ➔ La perméabilité du sol,

- ➔ L'intensité de la pluie,
- ➔ La pente du terrain.

Il s'agit d'un phénomène complexe où plusieurs paramètres jouent un rôle controversé : la capacité d'infiltration décroît d'une capacité instantanée d'infiltration à une valeur dépendant de la perméabilité et de la capacité de formation d'une croûte de battance, la pente jusqu'à une certaine valeur fait augmenter le ruissellement mais cela dépendrait de nombreux paramètres parmi lesquels la présence et la nature de la végétation joue un rôle important (Hénensal, 1986, 1993).

I.3.1.2 L'érosivité des pluies

L'érosivité des pluies est une quantification de l'agressivité de celle-ci. Il s'agit d'une combinaison de l'énergie avec l'intensité d'une séquence de pluie homogène pendant 30 minutes

Par exemple pour la France métropolitaine l'érosivité varie suivant les régions entre 30 et 300 soit dans un rapport d'à peu près de 1 à 10.

Le facteur appelé érosivité varie en cours d'année de façon remarquable. Cette variation est indiquée sur la carte de la figure I-11 sous forme de rosace. Ainsi par exemple, dans le midi méditerranéen, les mois de septembre, octobre et novembre sont particulièrement dangereux. Cette zone est également en déficit hydrique par des précipitations faibles et une évapotranspiration importante. Ce sol peu humide s'il est plutôt pulvérulent sera érodé facilement par ces pluies violentes. Il est évidemment recommandé d'en tenir compte, si possible, lors de la conception de la solution anti-érosive.

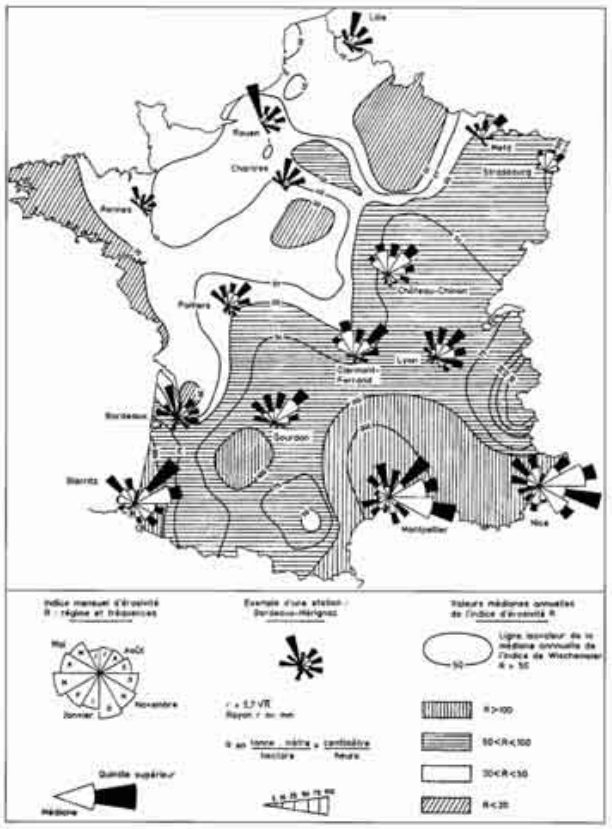


Fig. I-11 Carte de l'érosivité (d'après Pihan, 1975)

I.3.2 La houle et les courants

I.3.2.1 vagues et batillage

I.3.2.1.a vagues dues à la houle

Lorsqu'à proximité du rivage, la profondeur de l'océan diminue, les vagues deviennent de plus en plus pentues, l'angle aigu en tête de vague décroît et un déséquilibre se produit entre la vitesse de l'eau en surface et sur le fond. La base de la vague est gênée dans son mouvement. La crête avance plus vite et tend à s'écrouler dans le creux qui la précède. La vague casse lorsque la profondeur d'eau descend en deçà d'une valeur critique, alors la crête de vague s'effondre, déferle et frappe la pente. La masse d'eau tombant sur la pente crée des contraintes d'impact (figure 1-13).

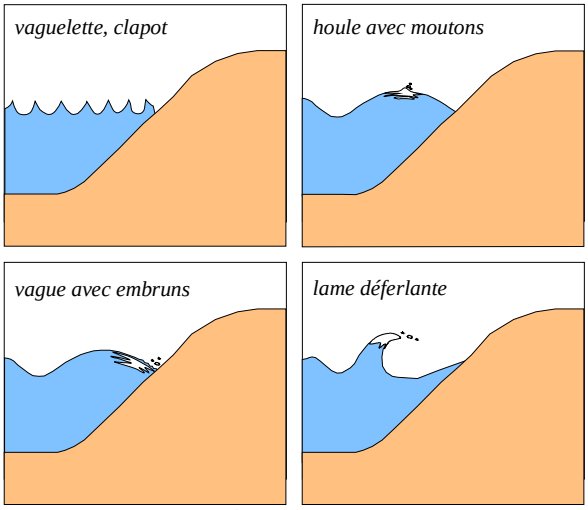


Fig. I-12 différents types de vague

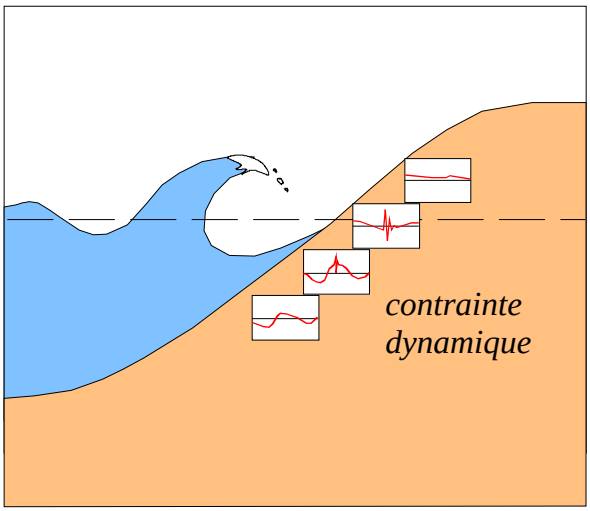


Fig. I-13 répartition des contraintes sur la pente

La direction de propagation des vagues est dépendante de la topographie sous-marine. Pour une profondeur égale à la demi longueur d'onde d'un train de vagues, celles-ci tendent à se disposer parallèlement aux isobathes. On observe donc des divergences des crêtes de vagues, lorsqu'elles rencontrent une vallée sous-marine, et il existe une convergence après les reliefs immergés. Il y a donc dissipation de l'énergie dans les baies et, au contraire, concentration au niveau de caps.
Le mode de déferlement à la côte diffère donc en fonction de la bathymétrie et de l'énergie déployée par les agents de la morphogenèse (figure 1-12). Lorsque la plage sous-marine accuse une faible pente, la houle est dissipative ; au contraire, une forte pente génère une houle reflective.
Les efforts générés sont de deux sortes :
- la charge hydrostatique liée à la variation du niveau de l'eau,
- la surpression interstitielle liée à l'impact de la vague (figure I-13).

Ces efforts se répartissent différemment le long de la pente :
- sous le niveau de l'eau, on observe une variation de la charge hydrostatique,
- dans une zone de transition, se superpose un signal oscillatoire,
- dans la zone d'impact, la charge prépondérante est le signal oscillatoire (impact et amortissement) et
- au-dessus de la zone d'impact de faibles variations de charge hydrostatique.

Le ressac peut créer une dépression propice à une rupture interne par glissement, due à une diminution des forces stabilisatrices et à une diminution de la compressibilité de l'eau liée au phénomène de cavitation et à l'apparition de bulles d'air. Cette action peut produire la liquéfaction du sol.
Le temps ou durée d'action et la distance ou longueur d'action permettent d'évaluer la force du vent de mer (tableau I-2).

Tableau I-2 Types de houle selon la force du vent

	Force 2 Brise légère	Force 6 Vent fort	Force 10 Forte tempête
Longueur d'action	0,56 mille	140 milles	1 570 milles
Durée d'action	0,7 heure	15 heures	73 heures
Périodes des vagues	1,4 seconde	7 secondes	14,7 secondes
Longueur des vagues	2 mètres	51 mètres	225 mètres
Hauteur des vagues	0,05 mètre	2,5 mètres	15,8 mètres

La surface du talus est soumise à la fois à l'action de la masse d'eau "extérieure" due à la vague et celle de l'eau "interne" se déplaçant dans la partie superficielle mais déphasée par rapport à la première. C'est ce déphasage qui jouera donc un rôle important dans le processus de destruction de la carapace. Le déphasage dépend des caractéristiques géométriques, de la perméabilité de l'ouvrage, pour beaucoup de la période de la houle.

➔ Cas des périodes faibles : l'eau interne est en retard par rapport à la vague externe. La montée de la vague est alors contrariée, et la descente de l'eau est ralentie. L'effet destructeur est faible (même dans le cas des houles déferlantes et celles de hauteur croissante).

➔ Cas des houles de grandes périodes : l'eau interne et la vague sont en phase. Il y a donc un freinage de la vague faible. Le déferlement frappe une carapace vide d'eau, à l'intérieur de laquelle l'eau se dissocie, soit vers le haut en provoquant le franchissement, soit en s'écoulant rapidement vers le bas.

Les effets nocifs s'atténuent pour les houles de très grandes périodes pour lesquelles la vitesse des particules diminue.

Les houles les plus dangereuses, pour les talus d'enrochement, sont celles ayant une période de 8 secondes.

I.3.2.1.b batillage

Ce battement de l'eau sur les berges dû au déplacement des bateaux ou au clapot voit son action érosive accentuée par une combinaison de facteurs comme la nature du substrat formant les berges et la vitesse d'écoulement dans le chenal. L'action des vagues finit par saper la berge et le substrat glisse peu à peu dans l'eau.

I.3.2.2 marnage

Les variations du niveau de l'eau dans un cours d'eau peuvent être dues

- à la houle,
- au passage de navires (figure I-14),
- à l'action humaine : éclusage.

Les variations de niveau liées au passage de bateaux ont une période inférieure à la minute alors que les marées ont une période de quelques heures. La diminution de hauteur d'eau dans un canal lors du passage d'un bateau peut entraîner soit par diminution de pression soit par cavitation, l'apparition de bulles d'air. De ce fait, la compressibilité de l'eau est augmentée.

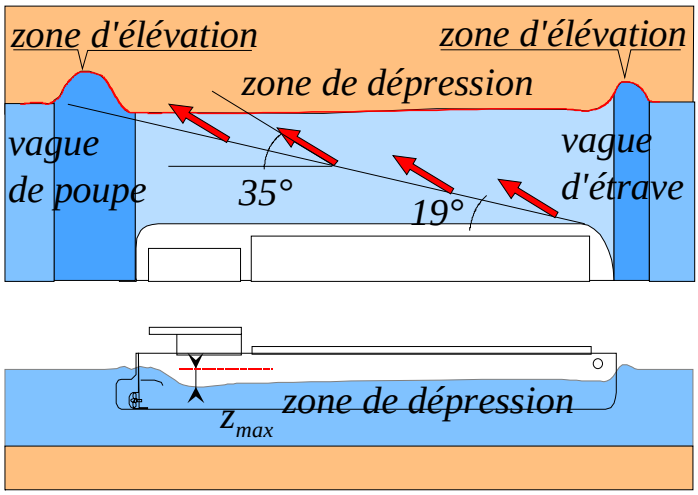


Fig. I-14 différents types de vague.

Cela peut être produit aussi par l'élévation de la nappe phréatique lors de fortes houles du fait que la zone de déferlement est toujours plus grande que le ressac.

I.3.2.3 jet d'hélice et courant

Les courants naturels ou dus à des jets d'hélice imposent d'importantes forces de dragage au terrain et l'érosion s'initie lors du dépassement de la vitesse admissible.

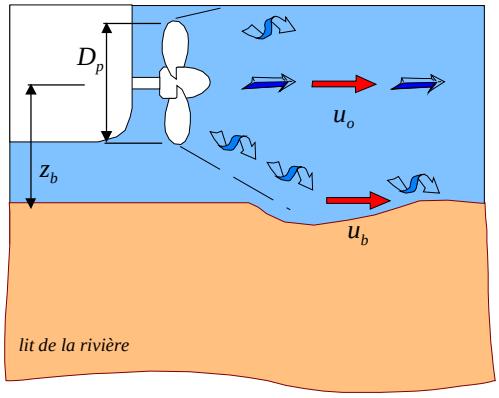


Fig. I-15 jet d'hélice

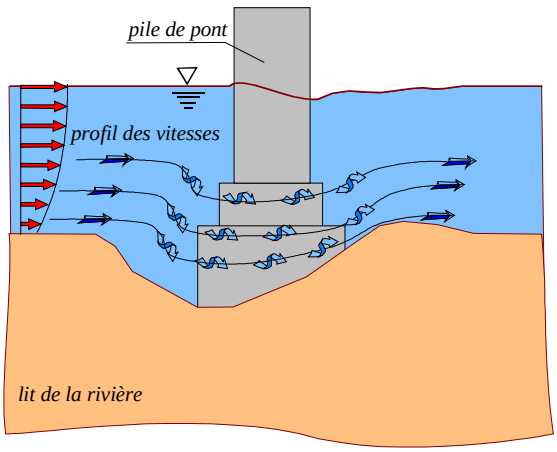


Fig. I-16 turbulence autour d'une pile de pont

I.3.2.3.a Jets d'hélice

Depuis le début des années 70, l'érosion provoquée par les jets d'hélice et les risques associés d'endommagement des lits des cours d'eau navigables ont fortement augmenté sous l'effet de la puissance accrue des moteurs et du recours aux propulseurs latéraux sur les navires modernes

(figure I-15). La vitesse provoquée en fond par le jet d'hélice dépend du type de manœuvre : démarrage ou manœuvre à vitesse lente ou navigation. Dans le premier cas, on peut utiliser la relation proposée par l'AIPCN (1987), dans le second on peut utiliser les estimations du tableau suivant :

Tableau I-3 Vitesse de l'eau en fonction de celle du bateau

Vs vitesse bateau	0	1	2
Ub vitesse de l'eau	2,5	2,0	1,5

I.3.2.3.b Courants fluviaux

En fond de cours d'eau (figure I-17)

L'érosion en fond de cours d'eau s'effectue dans l'espace de liberté à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales permettant une mobilisation des sédiments ainsi qu'un fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres. Cet "espace de liberté" qui est en passe de faire l'objet de réglementation n'est pas de même nature suivant le type de cours d'eau ; deux "styles fluviaux" principaux sont pris en compte : "les rivières à chenaux uniques et sinueux" et les "rivières en "tresses" (figure I-17). Cet "espace d'expansion" est défini par deux concepts: un concept morphologique (divagation maximale théorique du cours d'eau) et un concept de gestion qui dérive du précédent et qui permet de définir "l'espace minimal à préserver pour permettre au cours d'eau de conserver son potentiel d'ajustement en plan et en long en fonction de l'évolution" des débits liquides et des débits solides.

L'érosion est principalement due au courant, qui au-delà d'une certaine vitesse, arrache puis entraine les particules de sol. Ce phénomène dépend de la géométrie : pente des berges, largeur et courbure des chenaux, etc. Les efforts et contraintes de cisaillement provoquant l'arrachement sur le fond et les bords peuvent être estimés par la formule de Shield (Koerner, 1990).

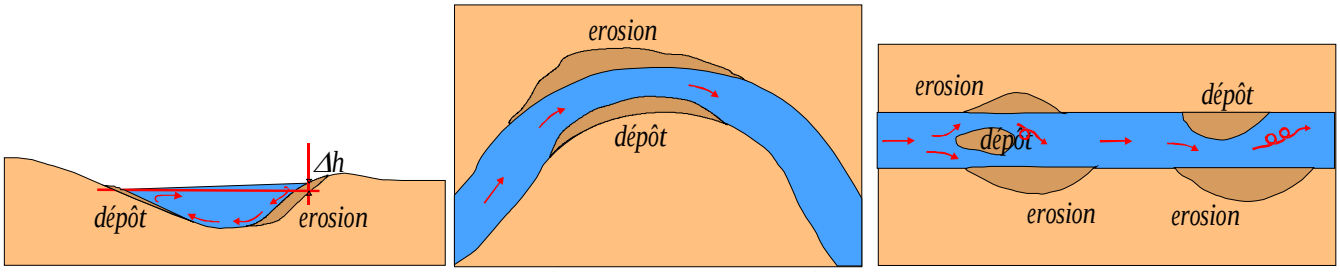


Fig. I-17 les différentes actions de l'érosion fluviale

En France, les principales rivières concernées sont celles du Sud-Est, celles du Nord des Alpes, les affluents du Rhône et de la Durance ainsi que La Loire.

Au voisinage d'un Ouvrage

La présence d'un ouvrage provoque un rétrécissement qui entraîne une augmentation de vitesse à l'entrée (figure I-16). Il en résulte une concentration de tourbillons d'axes horizontaux se développant en forme de fer à cheval autour de l'obstacle. Ces fortes turbulences et les vortex dus à des discontinuités induisent des forces de soulèvement (composante verticale de l'écoulement) arrachant les matériaux du lit.

I.3.2.3.c Courants marins

Le jet de rive provoqué par la houle est compensé par un courant de retour qui ramène l'eau vers le large en suivant le fond. Ce mouvement contraire à la direction de propagation des vagues accentue leur freinage à la base et amplifie le déferlement. Cet effet peut être atténué par la rugosité de la paroi rencontrée qui crée des frottements dissipateurs d'énergie.

I.3.3 Eau interne[2]

On ne saurait clore ce paragraphe sans présenter l'érosion dite « interne ». Celle-ci est due au flux provenant de l'eau interne au sol. Il peut s'agir d'une source : résurgence d'une nappe phréatique, ou de l'abaissement de la nappe au niveau d'une berge suite à un marnage naturel ou provoqué par l'homme. Cela peut être aussi dû à un écoulement préférentiel initié par le terrier d'un fouisseur. Mais l'érosion interne apparaît sous d'autres formes comme : l'entraînement, le débourrage, l'érosion régressive, la défloculation, la dissolution. Dans tous les cas, cette résurgence peut aboutir à une érosion de la surface de suintement par entraînement des fines et à des solifluxions par diminution des caractéristiques à court terme du sol lors des cycles gel-dégel.
Un phénomène bien connu de l'entraînement hydraulique est le soulèvement hydraulique ou « boulance » ou « renard ». Il peut également s'agir de l'entraînement d'une fraction granulométrique ou suffusion.
La mise en place de tranchées ou de galeries drainantes peut diminuer le risque d'instabilité des pentes liés à l'eau interne.

I.3.4 Le vent

L'érosion éolienne affecte les terres agricoles et les sols sableux. L'impact du vent tient aux modifications des conditions d'humidité, qui découlent elles-mêmes de la quantité des précipitations ainsi que des changements des températures. Le vent peut alors jouer un rôle considérable.

I.3.4.1 En plaine

C'est le cas dans les zones arides, où l'action mécanique des particules en suspension est particulièrement abrasive.

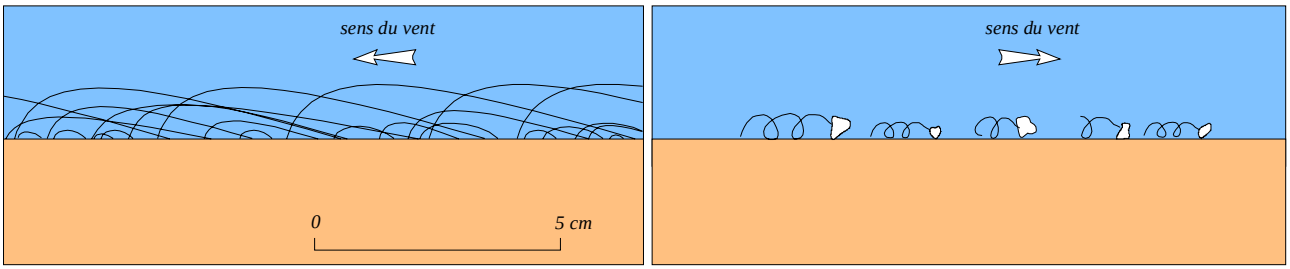


Fig. I-18 Mouvement de saltation de grains de sable dans l'air (Bagnold, 1941) et de reptation.

Si aucune averse ne vient ralentir le processus, lorsque l'humidité a suffisamment diminué afin que les particules ne soient pas agglomérées, le mouvement débute (figure I-18). Les particules les plus légères sont éjectées sur quelques décimètres de longueur. Avec la gravité, elles retombent et provoquent un effet de splash. Une particule perd son énergie en enfouissement et en éjectant d'autres particules. C'est la saltation. Les particules qui rebondissent le font avec un angle de 50° par rapport à l'horizontale. Après avoir été accélérées par le vent, les particules retombent avec un angle d'impact de 10 à 15° par rapport à l'horizontale. Un nuage rasant d'un mètre de hauteur au maximum se déplace sur le sol. Les particules lourdes, plus grossières, ne peuvent pas être éjectées mais sont roulées. Elles se déplacent quasiment à l'horizontale, c'est le charriage. Les fines particules mises en suspension par la turbulence de l'air ou projetées par le rebondissement de plus grosses particules en saltation ou d'autres phénomènes se déplacent sans toucher le sol. Cette diffusion turbulente ou suspension peut correspondre à de fortes hauteurs : jusqu'à une centaine de mètres.
Dans les grandes plaines agricoles, l'érosion éolienne se chiffre en centaines de kilos par hectare et par an, les talus des voies de circulation, qui offrent une résistance au vent, en sont aussi victimes.

I.3.4.2 Sur le littoral

Sur le littoral, les déplacements des sédiments éoliens dépendent de la mer, de l'air et du sol.

- ➔ Tout d'abord, l'intervention de la mer : à chaque marée, la plage s'imprègne d'eau et il faut quelques heures de marée descendante pour que la surface s'assèche et que le sable puisse décoller. Donc, les estrans larges où la mer s'éloigne rapidement du trait de côte

[2] Ce type de risque est traité dans le guide Comité Français des Géosynthétiques « Ouvrages courants » ou le numéro spécial du bulletin du Comité Français des Grands Barrages N°6 « Erosion interne : typologie détection et réparations. ».

présentent des conditions plus favorables à la déflation.

- ➔ Ensuite, le rôle très important du vent: c'est lui qui est à l'origine du déplacement et on parle de seuil de déflation. En théorie, il faut 16 nœuds pour que le sable vole. Par conséquent, dès que l'on annonce plus de 30 km/h ou force de 4 à 5 sur l'échelle de Beaufort, on peut s'attendre à des déplacements. En fait, c'est plus compliqué car le vent est caractérisé par sa vitesse mais également par son humidité et sa direction. Par exemple, l'air sec permettra une meilleure déflation que l'air humide.
- ➔ Enfin le rôle du sol : dans le détail les plages de sable ne sont pas toutes identiques. Le sable qui les constitue est spécifié par son humidité, par les proportions de coquilles ou de quartz, par la forme et la taille des grains. Ces caractéristiques influencent le transport, mais dans quelles proportions ?

La déflation dépend donc, sur nos rivages, d'un grand nombre de facteurs qui font que malgré un vent fort, les déplacements peuvent être inexistants. Ajoutons que des paramètres secondaires tels que les croûtes de sel et les rides de plage interviennent aussi et modifient la déflation.
Lorsque le vent souffle fort, il faut que la mer se retire pendant plusieurs heures ou que le vent soit parallèle à la plage pour qu'il y ait déplacement. Le vent violent assèche le sable. Le processus se déclenche dés que l'humidité a suffisamment diminué.

I.3.5 Synthèse

L'aménagement d'un site nécessite sa stabilisation et sa mise en sécurité, ce qui implique la limitation de l'érosion. L'aléa érosion est lié à la rupture d'un équilibre fragile : travaux qui découvrent le substrat, coupe d'arbres qui stabilisaient et drainaient une pente, modification d'un cours d'eau qui diminue les apports en sédiments, construction d'un ponton qui bloque la dérive littorale. L'aménageur devra prendre en compte le risque érosion, et envisager tous les événements qui y sont liés, pour apporter une réponse la plus adaptée et surtout pérenne. Le danger provient de l'action mécanique du facteur climatique considéré, et est aggravé lorsque ce facteur génère également des contraintes à l'installation de la végétation (risques souvent liés). De manière générale, tous les climats présentant des forts contrastes, des amplitudes élevées sont des climats à risque. A ce titre, on citera les climat tropicaux et sub tropicaux des DOM/TOM (cyclones,...) ? Si les climats de mousson sont un exemple de ces risques, n'oublions pas qu'un simple orage peut avoir les mêmes effets dramatiques (cf. la catastrophe de Nîmes, 1988).

I.4 LES OUVRAGES À RISQUES

Les ouvrages à risques existants sont généralement répertoriés et suivis. Les ouvrages à risques les plus dangereux sont ceux que l'homme fabrique en modifiant un équilibre établi. Sur les chantiers de génie civil, le danger potentiel de l'érosion sur l'emprise même du projet (zone d'étude) et sur son secteur d'influence (aire d'étude du projet et de ses impacts) doit être apprécié avant le commencement des travaux. Pour cela il convient de prendre en considération un certain nombre d'indications parmi lesquelles les caractéristiques générales des travaux et de leur environnement naturel. Certains travaux sont susceptibles d'entraîner de fortes érosions :

- ➔ les travaux de dessouchage et de nettoyage de l'emprise,
- ➔ les opérations de décapage et le mouvement des terres (figure I-20),
- ➔ les constructions des fossés, aqueducs et buses (figure I-19),
- ➔ les constructions des pistes d'accès et les reprofilages,
- ➔ les travaux d'emprunt ou de stockage des matériaux.

Fig. I-19 Exemples d'ouvrages hydrauliques subissant l'érosion

Fig. I-20 Exemples de travaux récents subissant l'érosion pluviale

Mais les travaux les plus dangereux sont ceux qui changent les caractéristiques hydrauliques des cours d'eau en créant des affouillements ou des dépôts intempestifs.

- ➔ les empiétements des travaux de construction d'ouvrages d'art (piles ou culées) dans les cours d'eau,
- ➔ les franchissements temporaires des cours d'eau (figure I-21),
- ➔ les dragages hydrauliques ou mécaniques,
- ➔ les déviations, élargissements, approfondissements et réalignements des cours d'eau.

Pont de Castelo de Paiva (Portugal, 2001)

Fig. I-21 Exemples d'ouvrages hydrauliques subissant l'érosion fluviale

Il en est de même sur le littoral avec :

- ➔ les constructions sur des terrains gagnés sur la mer ou trop proche du rivage (figure I-22),
- ➔ les extractions incontrôlées ou intempestives de matériaux marins,
- ➔ les ouvrages portuaires et de débouché en mer des fleuves côtiers.

Toutes ces modifications d'un équilibre fragile, mineures certes si considérées de façon isolée, peuvent néanmoins être à l'origine de grandes catastrophes ou aggraver de façon substantielle un risque naturel existant.

Italie
Calabre
1982
1985

France
Criel
2000

Fig. I-22 Exemples d'ouvrages hydrauliques subissant l'érosion littorale

I.5 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES TECHNIQUES GÉOSYNTHÉTIQUES UTILISABLES DANS LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION

La gamme de géosynthétiques disponibles pour le projeteur lors de son étude est vaste. Dans cette gamme on peut définir les trois grandes familles en fonction de la géométrie du produit géosynthétique :

- ➔ Uni dimensionnel, il se présente sous forme de fils, tube,
- ➔ Bi-dimensionnel, il constitue une nappe,
- ➔ Tridimensionnel, il contient du sol ou un matériau.

Bien sûr, cela ne signifie pas que le nombre de dimensions du géosynthétique correspond au nombre de dimensions présentes dans l'ouvrage étudié. En fait, plus le nombre de dimensions du géosynthétique est grand plus celui-ci sera apte à traiter le problème en profondeur (figure I-23). Cette profondeur est définie à partir de la surface du sol subissant l'érosion.

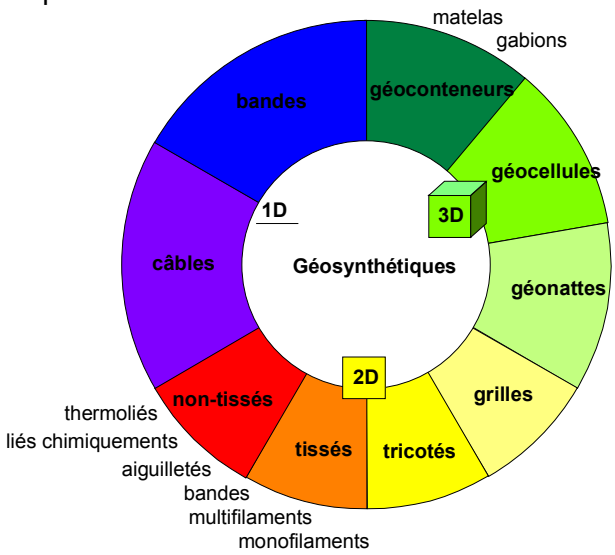


Fig. I-23 Présentation des différents types de géosynthétiques

Certains géosynthétiques possèdent les caractéristiques bidimensionnelles et tridimensionnelles suivant l'échelle à laquelle on se place.
Il est par ailleurs possible de réaliser de nombreuses combinaisons pour créer des complexes profitant des caractéristiques des géosynthétiques le composant. On peut, par exemple, fermer les

cellules d'un géoconteneur avec des nappes géosynthétiques pour réaliser un matelas proche d'un géomatelas.

La classification traditionnelle des géosynthétiques utilisés en lutte contre l'érosion se fait le plus souvent suivant le type de structure et de fabrication : les nattes, les géogrilles et géofilets, les bionattes, les géoalvéoles.

Une classification suivant leur fonction nous paraît toutefois plus appropriée. C'est ce qui est tenté ci-dessous.

I.5.1 Systèmes de confinement géoconteneurs (CGC)

Sous cette dénomination le nombre de produits est très varié et recouvre un domaine qui va du sac de sable à des sacs de grandes contenances de 200 à 2000 m^3. Les conteneurs peuvent être de différentes formes à 1D, 2D, ou 3D :

- 1D - des tubes de section circulaire ou elliptique plus ou moins aplatie, dont la longueur est grande devant le diamètre.
- 2D - des matelas d'épaisseur environ 20 à 30 cm, étalés à plat sur la berge. Ils sont composés de 2 nappes textiles liées entre elles par des coutures ou des liens permettant le maintien des 2 nappes lors du remplissage. Ils sont généralement posés en une seule couche.
- 3D - des sacs parallélépipédiques ou cylindriques peu allongés, posés directement sur la berge en une seule couche ou empilés. Les sacs ne sont pas complètement remplis pour leur conférer une déformabilité, leur permettant d'épouser la géométrie du sol support et d'augmenter la surface de contact. Les tissés peuvent avoir une plus grande résistance en traction tandis que les non tissés ont un meilleur coefficient de frottement et sont plus déformables (localement).

Lorsqu'ils sont remplis de matériaux naturels, il s'agit d'un sol grenu provenant du site ou à proximité (sable ou limon sableux) : dans ce cas la fonction conteneur du géotextile doit être pérenne durant toute la durée de vie de l'ouvrage. Ils ont l'avantage de garder une certaine souplesse leur permettant de s'adapter aux tassements éventuels.

S'ils sont remplis de matériaux avec adjonction d'un liant, la fonction conteneur doit être assurée essentiellement pendant le temps nécessaire à l'obtention de la résistance désirée du matériau ; après quoi le géotextile n'a plus de rôle particulier à remplir sauf éventuellement d'assurer la liaison entre les éléments en béton ainsi réalisés.

I.5.1.1 Les conteneurs tubes (figure I-24)

Le fait d'injecter des matériaux dans une enveloppe ronde de géotextile permet de créer des ouvrages soit de protection de berge, soit de faire des ouvrages immergés notamment pour protéger les côtes contre l'érosion ; voire pour constituer un barrage dans des opérations de lutte contre la pollution marine. L'intérêt principal de ces structures réside dans le fait qu'elles sont continues, souples et perméables. Les conteneurs tube sont des tubes reconstitués à partir de bandes de textile dont les dimensions sont variées et dont le remplissage peut aller du sol en place au béton.

Fig. I-24 Protection de rivage en conteneur

Certains conteneurs développés au Pays Bas permettent d'immerger des sacs de 200 à 2000 m^3 en grande profondeur. Ces derniers ont pour application la lutte contre des glissements de berges ou faire le noyau d'un ouvrage immergé ou d'une digue. Ces sacs ne sont mis en œuvre qu'à partir de barge à clapet donc avec un tirant d'eau suffisant.

I.5.1.2 Les conteneurs matelas (figure I-25 et I-26)

Utilisés principalement en protection de berge, l'enveloppe des systèmes appelés matelas peut être

réalisée à partir de géotextiles ou de grillage métallique. Ces procédés sont performants pour la lutte anti-batillage ou pour remplacer des enrochements.

Fig. I-25 Exemples de conteneurs matelas

Fig. I-26 Conteneur matelas en grillage

Les matelas géotextiles sont remplis par injection de coulis de béton, le géotextile ayant pour fonction d'être un coffrage, alors que les matelas de grillage sont remplis de cailloux et posés sur un géotextile ayant pour fonction la séparation et la filtration.

I.5.1.3 Les conteneurs sacs et conteneurs multicellulaires (figure I-27)

Tout le monde connaît leur utilisation dans des situations d'urgence. (rupture de digues, confortement provisoire,...) où des produits standards sont généralement mis en œuvre. Des fabrications spécifiques et sur mesure interviennent également dans des interventions d'entretien ou de réparation d'ouvrages maritimes et fluviaux. Les conteneurs peuvent, dans certaines configurations, être remplis de manière semi-automatique par des trémies spécifiques.

Fig. I-27 Remplissage et manutention des sacs de sable

Il s'agit de sacs de manutention avec des sangles de manutention dont les applications sont nombreuses suivant le remplissage qui peut aller du sol en place au béton.

Il peut s'agir également de structures multicellulaires en géotextile enveloppé de grillage métallique dont le fond et le couvercle sont ouverts permettant ainsi une mise en œuvre rapide, et donnant la possibilité de réutiliser le cas échéant la structure.

I.5.2 Systèmes de confinement géoalvéolaire (CGA)

Il s'agit de géosynthétiques se présentant non plus en nappes mais en alvéoles, donc tridimensionnels. La taille de ces cellules de confinement pour le sol peu varier en épaisseur et en largeur. Leur fonction est essentiellement relative à la meso-stabilité de la couche de surface de quelques centimètres. Les Géoalvéoles empêchent le déplacement de cette couche grâce à leur résistance en traction, tangentiellement à la pente.

Par contre, les géoalvéoles, avec leurs grandes ouvertures de surface n'apportent aucune protection contre la battance. On peut remédier à cet inconvénient soit à l'aide d'une couverture par natte ou par géosynthétique de protection par exemple, épinglée sur les géoalvéoles, soit en remplissant les alvéoles d'un matériau graveleux. En ce qui concerne la résistance au ruissellement, elle dépendra de la largeur et de la hauteur des alvéoles, chaque bord d'alvéole transversal agissant comme un micro-fascinage.

Reste l'important problème de la circulation hydraulique pour l'eau d'infiltration. Les parois des géoalvéoles sont constituées d'éléments perméables, permitifs et transmissifs, ou imperméables (feuilles plastiques). Dans le cas d'imperméabilité, l'infiltration entraînera nécessairement une percolation sous la couche géoalvéolaire.

Une expérience avec des géoalvéoles en non-tissés, donc pourtant perméables, a mis en évidence un problème de percolation sous-jacente après de fortes pluies, avec formation de ravines. Cela apparaît lorsque le sol est plus perméable que la structure, ce qui peut provenir d'un talus mal profilé ou d'un mauvais agencement des perméabilités mises en œuvre. Ces ravines ont par voie de conséquence lessivé localement les alvéoles de leur sol granulaire de remplissage.

Ceci amène à réfléchir sur une autre propriété fondamentale des matériaux de couverture anti-érosion: la flexibilité ou aptitude à se conformer au sol de base, de manière à éviter la création de vides à l'interface géosynthétique - sol à recouvrir. En effet, si le sol sous-jacent n'est pas confiné par la protection de surface, il est certes protégé de l'effet de battance, mais reste sensible aux phénomènes de ruissellement et d'érosion sous-jacente.
La mesure de cette flexibilité, à cette échelle, est difficilement quantifiable. Un essai standard ("essai de souplesse") existe pour les nappes géosynthétiques uniquement. Il est certain que les géoalvéoles avec leur matrice de sol confiné présentent une souplesse en flexion inférieure à celle des nattes par exemple. Leur aptitude à s'adapter à une surface présentant des ondulations est donc faible.

I.5.2.1 A paroi textile (figure I-28)

Le procédé utilise une nappe alvéolaire régulière constituée de bandes de géotextiles soudées par points ou cousues entre elles. Le géotextile utilisé peut être une bionatte ou un non tissé aiguilleté, composé de fibres continues polyester, imprégné de résines pour conférer une certaine rigidité à la nappe.

La maille hexagonale a une profondeur décimétrique et un côté généralement du même ordre de grandeur.

La nappe peut pour des applications sur forte pente ou sur support lisse être renforcée à l'aide de grillage métallique agrafé au géotextile à l'aide de crochets.

Fig. I-28 Exemples de système de confinement géoalvéolaire

I.5.2.2 A paroi plastique (figure I-29)

Il s'agit d'une structure alvéolaire type nid d'abeilles. Ces parois imperméables peuvent être perforées pour permettre le passage de l'eau le long de la pente.

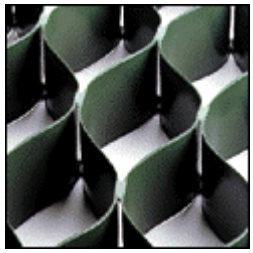


Fig. I-29 Exemples de système de confinement géoalvéolaire

Le produit s'utilise sous forme de nappes d'épaisseur décimétrique avec des alvéoles d'environ une quinzaine de centimètres de côté ou sous forme de blocs avec une épaisseur pouvant être presque métrique, l'alvéole faisant quelques millimètres à quelques centimètres de coté. Les nappes peuvent se replier tandis que les blocs extrudés à la fabrication arrivent sur chantier avec leur géométrie finale. Les blocs peuvent avoir des alvéoles obturées sur une face par un non-tissé.

I.5.2.3 A poches (figure I-30)

On désigne également sous le nom de géoalvéoles, les géosynthétiques à poches. Ce type de produit est constitué d'un support destiné à reprendre des efforts de traction et de reliefs, sous forme de bandes horizontales vrillées ou de poches cousues, dont la fonction est de contenir le sol, fixées et espacées d'une distance décimétrique.

Fig. I-30 Exemples de système de confinement à poches

I.5.3 Nattes de renforcement du sol d'apport (RSA)

Ces systèmes appelés "nattes" se présentent en nappes d'épaisseur généralement centimétrique, de structure très ouverte, permettant un remplissage aisé en sol et graines de semence. Il peut s'agir de géonattes synthétiques pérennes ou de bionattes biodégradables.

Comme pour les géoalvéoles, le premier objectif de ces matériaux est de stabiliser la couche de sol de surface (meso-stabilité). Lorsqu'un simple ancrage en tête reprenant l'effort total de glissement n'est pas suffisant, un micro-clouage ou épinglage espacé le long de la pente qui répartit la reprise de l'effort tangentiel est alors nécessaire. Si des aménagements particuliers nécessitent une résistance à la traction supérieure à celle du produit seul, la géonatte est renforcée à l'aide d'une géogrille ou d'un grillage métallique.

Si la "meso-stabilité" est vérifiée, ces nattes peuvent jouer un rôle complémentaire en "micro-stabilité" à la différence des géoalvéoles : le réseau de fibres assez dense peut protéger partiellement contre l'effet d'impact des gouttes de pluie et agir comme un tissu racinaire contre le ruissellement.

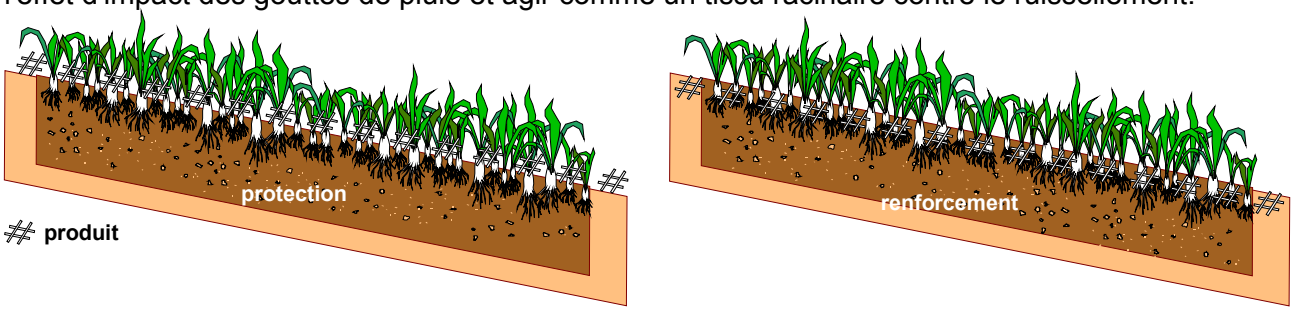


Fig. I-31 Nattes de renforcement et géosynthétique de protection

Cependant ici aussi la qualité de l'interface entre la natte et le sol de base, est fondamentale, si l'on veut éviter écoulement préférentiel et lessivage dans cet espace. Notons que l'épinglage conseillé pour reprendre les efforts résistants au glissement peut aussi apporter une force normale propre à plaquer la natte sur son sol support.
Par extension du concept de substitut synthétique au tissu racinaire, une compagnie japonaise a proposé d'utiliser une technique dérivée du Texsol, consistant à étendre sur une pente un mélange de fils continus et d'un mélange sol-graines. La stabilité au glissement est assurée par des picots régulièrement espacés sur la pente.
En ce qui concerne le problème de meso-stabilité, la résistance en traction des bionattes étant généralement faible, et décroissant dans le temps, se développe actuellement l'utilisation de produits mixtes à base de fibres naturelles et de fibres synthétiques, permettant un fonctionnement avec un ancrage des nappes.
En cas d'utilisation temporaire, ouvrage non permanent ou temps nécessaire à la prise de la végétation pour un ouvrage permanent, ces bionattes ou géonattes biodégradables peuvent dont être utilisées. Le problème réside donc d'abord dans l'assurance d'obtenir une végétation stable avant dégradation significative de la bionatte. Les fibres naturelles ont un avantage spécifique sur les fibres synthétiques, c'est leur pouvoir de rétention d'eau qui permet une meilleure résistance du tissu végétal à la sécheresse, et complémentairement c'est aussi leur apport nutritionnel, les résidus de leur biodégradation étant récupérables par les plantes.

I.5.3.1 Bionattes (figure I-32)

A l'heure actuelle, le marché des géotextiles en fibres naturelles présente une grande variété de produits qui, de par leurs caractéristiques, peuvent être employés dans de nombreux aménagements. Il s'agit de paille, de fibres de coco, de sisal, de jute … Ces produits sont parfois doublés par des feuilles biodégradables.

Les premiers retours d'expérience mettent en évidence que les notions de résistance à la rupture, d'élasticité, de capacité d'absorption d'eau sont des caractéristiques techniques importantes pour déterminer l'emploi de ces produits.

Il apparaît aussi que la durée de vie des géotextiles naturels présente de grandes disparités et est notamment sous l'influence directe des conditions de milieu (durée d'inondation, cycles inondations/exondations, marnage, batillage).

Dans le cas des produits à base de fibre coco, une première approche a permis de montrer que ces caractéristiques étaient fortement liées aux paramètres suivants :

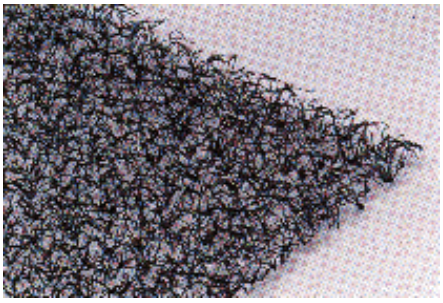
- type de fibres (fibre verte ou brune),
- traitement préalable (durée de trempage, décorticage, etc…),
- mode de fabrication de la corde,
- mode de tissage de la natte.

Ces caractéristiques ne sont pas suffisamment prises en compte lors du choix des géotextiles à utiliser pour réaliser des aménagements de qualité et pérennes. Ainsi la qualité plus ou moins bonne des matériaux qui constituent les nattes et filets peuvent être à l'origine de résultats variables sur l'efficacité du produit.

Fig. I-32 Bionattes

I.5.3.2 Géonattes (figure I-33)

Ce matériau est une nappe souple tridimensionnelle, constituée par un enchevêtrement de filaments, qui aide à la croissance de la végétation en stabilisant et en armant la couche superficielle du sol soumise à l'érosion. Les géonattes, présentants généralement une résistance à la traction relativement faible (de l'ordre de 1 à 2 kN/m), peuvent être renforcées à l'aide d'une géogrille ou d'un grillage métallique associé mécaniquement en usine aux filaments. Outre l'augmentation de la résistance (de 5 à 200 kN/m à justifier dans le cadre d'une étude de méso-stabilité), les renforts les plus résistants offrent également une barrière efficace et durable contre les fouisseurs, ils peuvent néanmoins affecter la souplesse du produit.



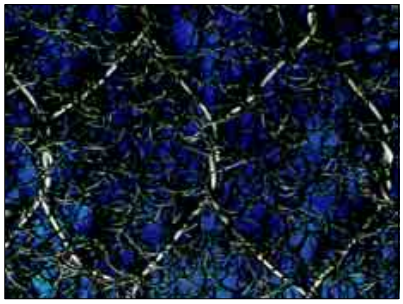


Fig. I-33 Géonattes

Leur structure est très variable: non-tissés de grosses fibres (crins) disposées aléatoirement, association par procédé thermique de plusieurs grilles souples à qui l'on impose des ondulations, par exemple. Son épaisseur est de l'ordre du centimètre. Cette nappe, qui comporte 95 % de vides, est destinée à être remplie de terre, sable ou gravillons.

I.5.4 Géosynthétiques de protection du sol d'apport (PSA)[3]

La fonction de ces nappes est relativement simple, elle doit agir comme protection superficielle contre l'effet de la pluie. Le géosynthétique est placé en couverture au-dessus du sol ensemencé. Ses

[3] Ces matériaux sont souvent appelés en anglais « Erosion Control Revegation Mats » ou « Turf Reinforcement Mats ».

ouvertures peuvent être plus petites que pour les Nattes de Renforcement du sol d'apport vues ci-dessus, puisqu'il n'y a pas l'opération de mélange sol-fibres, mais elles doivent cependant permettre la croissance des plantes au travers de la nappe.
Une résistance à la traction de faible niveau est suffisante, puisque la fonction de meso-stabilité n'est pas requise.
Différentes structures 2D en polymère ou naturelles peuvent correspondre à cette utilisation; géogrilles ou géofilets, tissés, non-tissés. Les Nattes, simplement posées en surface jouent alors un rôle différent de celui des RSA et constituent alors des PSA. Mais dans ce cas encore un contact intime entre le géosynthétique et le sol support est souhaitable. Ce contact est difficile à obtenir même pour des produits souvent minces et souples, en raison de la légèreté des nappes, accentuée par le fait qu'elles ne sont pas dans ce cas alourdies par des particules de sol incluses, ou sus-jacentes.

I.5.5 Filtration du sol support sous protection (FSP)

Ces nappes ont une fonction de filtration du sol support sous une protection qui peut être constituée d'enrochements ou de blocs artificiels (dont la taille va des pavés béton aux quadripodes béton). Pour les pavés bétons, il existe trois principaux types de liaisonnement des blocs bétons à la nappe : par adhérence, par clavetage, par coulage de béton autour d'une boucle du géotextile.
Il s'agit d'empêcher le déplacement des matières solides mises en suspension par les mouvement de l'eau. Le géosynthétique est placé entre le sol support et la protection. Les ouvertures doivent être choisies afin qu'il n'y ait pas l'opération de mélange sol-fibres, c'est-à-dire de colmatage du filtre par les particules en suspension.
Une résistance à la traction de faible niveau est suffisante, puisque la fonction de stabilité n'est pas requise mais le géosynthétique doit pouvoir résister à la mise en œuvre des blocs et donc avoir une résistance au poinçonnement suffisante.

I.6 RÔLES DES TECHNIQUES DANS LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION

I.6.1 Objet

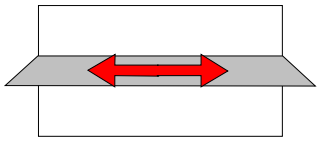
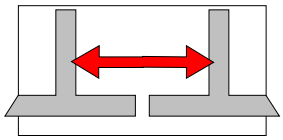
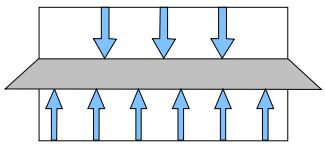
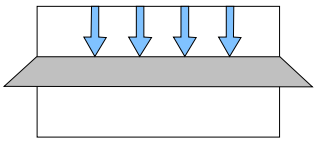
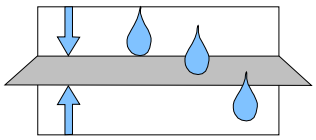
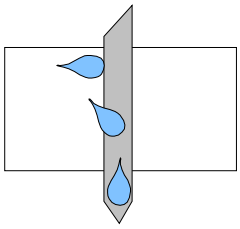
Les géosynthétiques sont appelés à jouer diverses fonctions qui peuvent schématiquement être réparties en six rôles : conteneur, renforcement, séparation, protection, filtre et drain (tableau I-4). Ces fonctions sont définies dans la norme NF EN ISO 10318.

Ces fonctions peuvent être présentes dans un géosynthétique ou dans plusieurs géosynthétiques assemblés en un géocomposite pour se compléter. Généralement, un géosynthétique possède une fonction principale à laquelle peuvent s'ajouter d'autres fonctions considérées comme secondaires.

Remarque
Certaines techniques constituent des solutions radicales de lutte contre l'érosion ; elles ne seront pas abordées dans ce guide. Cependant, on peut citer l'emploi fréquent d'un film étanche placé de façon temporaire lors de terrassements et destiné à prévenir l'érosion des talus ou des fouilles. Le béton est également utilisé pour protéger, par exemple, les barrages.

I.6.2 Définition des fonctions

Tableau I-4 Définition des fonctions

Fonctions	Symbole	Définition
RENFORCEMENT ARMATURE (NF-EN-ISO 10319)		Fonction faisant intervenir une mobilisation d'effort, c'est-à-dire utilisation de la capacité de résistance d'un géosynthétique ou d'un produit apparenté à des fins d'amélioration des propriétés mécaniques du sol. On distingue : Le macro renforcement au niveau du massif ou de la couche Le meso renforcement au niveau de la couche de sol d'apport Le micro renforcement au niveau de la particule de sol
CONFINEMENT (NF-EN-ISO 10321)		Cette fonction revient à envelopper et maintenir dans un volume déterminé un sol ou un matériau en le contenant dans une structure géosynthétique. Cette structure peut contenir le matériau complètement ou partiellement.
SÉPARATION (NF-EN-ISO 10772)		Le géosynthétique est utilisé en prévention contre le mélange de deux sols ou matériaux de remplissage adjacents par l'emploi d'un géosynthétique ou pour empêcher l'érosion interne d'un ouvrage.
PROTECTION (NF-EN 918 ET NF-EN-ISO 12235 ET 13427)		Il s'agit de diminuer l'agressivité d'un facteur extérieur sur un élément c'est-à-dire empêcher ou limiter les endommagements localisés concernant un élément ou un matériau donné en utilisant un géosynthétique. Il est possible d'agir à plusieurs niveaux : La macro protection au niveau de l'ouvrage La meso protection au niveau de la couche de sol d'apport La micro protection au niveau de la goutte d'eau.
FILTRE (NF-EN-ISO 11058 ET 12956)		Le géosynthétique constitue un obstacle physique s'opposant aux mouvements des particules solides du sol environnant, mouvements engendrés pour les ouvrages considérés par des écoulements d'eau. En ce sens, il fait fonction de séparateur entre deux matériaux de granulométrie différente tout en permettant le passage de fluide à travers ou dans le géosynthétique.
DRAINAGE (NF-EN-ISO 12958)		En général, il s'agit de l'action et de l'art d'évacuer d'un terrain, d'un sol, l'eau excédentaire, du point de vue de l'objectif de l'opérateur, au moyen de drains, généralement par gravité mais parfois par pompage. Dans le domaine particulier des géosynthétiques, cela englobe la collecte et le transport des eaux pluviales, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan du géosynthétique ou d'un produit apparenté.

Nous avons placé la définition des fonctions en correspondance avec le symbole de la norme ISO. Cependant la fonction confinement n'existant pas, nous avons repris le symbole utilisé pour cette famille de produit auquel nous avons superposé la flèche du symbole de la fonction renforcement.
On notera que le symbole lutte contre l'érosion de la norme NF EN ISO 10318, n'est pas présent dans cette liste car il a été jugé trop générique. Ces symboles sont repris dans les tableaux de décision ou organigrammes que nous avons mis en place.

I.6.2.1 Organigramme de décision

Au début de chaque chapitre, un organigramme (voir figure I-34) permet de faire un choix rapide des techniques selon les fonctions voulues. Cet organigramme est disponible pour chaque type d'érosion : pluviale, fluviale, littorale, éolienne, anthropique et animale.

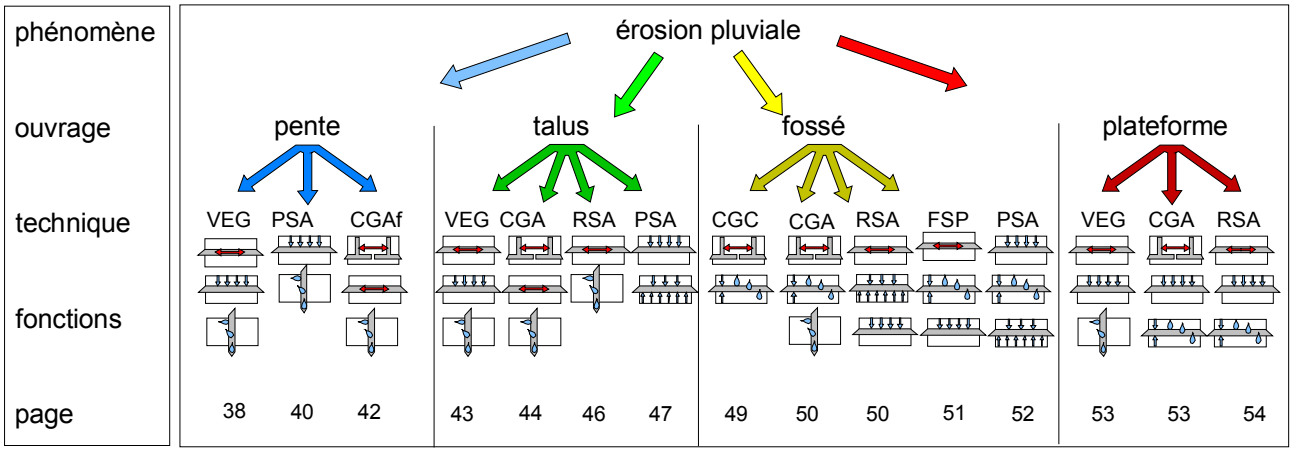


Fig. I-34 Organigramme de choix des techniques (cas de l'érosion pluviale, chapitre 2)

Ces organigrammes sont destinés à guider le lecteur lors d'un choix rapide. Le numéro de page est donné pour chaque solution. Un lecteur désirant combiner, par exemple, la lutte contre l'érosion fluviale avec la lutte contre l'érosion animale devra mener la démarche dans ces deux chapitres.

I.6.2.2 Tableau de pertinence

L'outil utilisé tout au long de ce guide pour présenter les fonctions remplies par le géosynthétique est un tableau comportant deux lignes (tableau I-5). La première comporte la liste des fonctions et la deuxième un indicateur de pertinence représenté par des croix.

Échelle de pertinence :

+++ très pertinent
++ moyennement pertinent
+ peu pertinent
0 sans objet ou inadapté

Tableau I-5 Tableau de pertinence

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		Micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence										

Ce tableau sera placé après la description des techniques et leur schéma.

I.7 SYNTHÈSE

Ce premier chapitre montre la diversité des sites, leur vulnérabilité plus ou moins importante à l'érosion, et la nécessité de choisir une technique spécifique au site considéré. Le choix d'une technique doit passer par une étude préalable détaillée. Les préoccupations actuelles de défense de l'environnement et de lutte contre l'érosion imposent le schéma suivant :

- une étude paysagère pour définir les lignes de remodelage du paysage ou des bords de voies d'eau ou du littoral, afin qu'ils s'harmonisent avec le relief environnant et les plantations à effectuer pour rétablir l'équilibre avec la végétation locale. Ce point est bien décrit dans des ouvrages techniques détaillés (par exemple METL et al., 1994) ;
- une étude d'impact pour préciser l'influence des dispositifs mis en œuvre sur la faune et la flore ;
- la mise en application de techniques élaborées pour stabiliser les pentes pendant la période d'implantation de la végétation. Il faudra en effet de nombreuses années avant que celle-ci atteigne son équilibre écologique et soit suffisamment développée pour protéger les terrains.

I.7.1 Le processus d'érosion

Ainsi que nous l'avons dit dans les paragraphes précédents, le processus d'érosion sera d'autant plus agressif que le facteur érosivité qui traduit la force d'action de la pluie ou des ruissellements ou des courants ou du vent se combine à une géométrie d'ouvrage défavorable et à des sols granulaires fins ou des limons peu plastiques (sols A1, B1, B2 et D1 de la classification N.F. P 11300 du Guide des Terrassements Routiers). Le risque décroît quand la proportion d'argile et/ou de matière organique s'accroît, quand l'indice des vides du sol ou le rapport du sodium adsorbé dans le sol décroissent ou que la force ionique de l'eau érosive s'accroît.

Cette présentation de l'érosion ne serait pas complète sans dire un mot sur l'équation de Wishmeier aussi appelée l'Equation Universelle de Pertes de Sols (Wishmeier et al., 1978). Cette équation développée par le milieu de la recherche agricole américaine avait pour objectif la prévision de l'érosion pluviale sur les terres agricoles (pente inférieure à 20%). Étendue à la prévision de l'érosion dans les terrassements et les emprises des ouvrages de génie civil, elle se révèle peu pratique du fait de la difficulté de détermination des paramètres empiriques de l'équation (Hénensal, 1986 ; Hénensal, 1993). Pour pouvoir l'utiliser dans les projets, il serait nécessaire de réaliser des expérimentations locales sur des parcelles témoins, ce qui est généralement irréaliste. De plus, ces équations utilisent des valeurs sécuritaires des paramètres susceptibles d'une très grande variabilité régionale et aboutissent donc à un surdimensionnement équivalent souvent à une prescription forfaitaire.

I.7.2 Les techniques anti-érosives géosynthétiques

Ce chapitre a présenté une classification des géosynthétiques anti-érosion en adoptant une distinction nouvelle des produits, non plus simplement en relation avec de leur structure, mais plutôt leur fonction, avec en fait une action graduellement plus superficielle, des systèmes de confinement géoalvéolaire aux géosynthétiques de protection en passant par les nattes de renforcement du sol d'apport.

Les structures anti-érosives vont généralement agir sur les facteurs suivants :

- ➔ la résistance intrinsèque du sol,
- ➔ la longueur de la pente et la déclivité de la pente,
- ➔ l'état de surface du sol.

Pour conclure cette présentation des problèmes d'érosion et des techniques de lutte incluant les géosynthétiques, nous insistons sur le fait qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode générale et fiable de dimensionnement des techniques anti-érosion et que les méthodes proposées pour un procédé donné ne sont pas transposables aux autres procédés. Ceci est accentué par la diversité des procédés ainsi que la spécificité de chaque phénomène érosif.

Seule l'expérimentation est à l'heure actuelle un moyen fiable de cerner les potentialités d'un nouveau produit et de l'intégrer dans les techniques présentées dans ce guide[4]. En annexe, le lecteur trouvera des propositions de méthodologie d'essai.

Le CFG met à la disposition du lecteur différents recueils de spécifications sous forme de guides CFG pour la rédaction :

- ➔ des CCTP,
- ➔ du RPAO,
- ➔ du PAQ,

et de recommandations pour :

- ➔ la réception et le contrôle des produits livrés et la mise en œuvre,
- ➔ la préparation et l'acceptation du support
- ➔ le calcul des ouvrages courants.

[4] Nous invitons les lecteurs à nous communiquer leur retour d'expérience qui permettrons d'amender les futures éditions du guide.

I.8 MODE D'EMPLOI

Les tableaux et organigrammes regroupés dans ce paragraphe sont destinés à servir d'outil de navigation pour l'utilisation au quotidien du document.

RAPPEL DES SYMBOLES

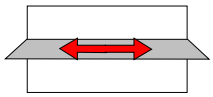
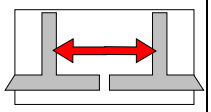
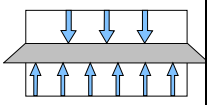
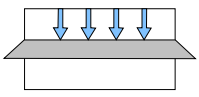
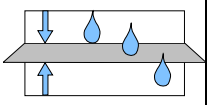
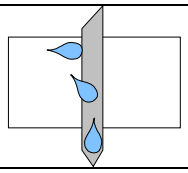
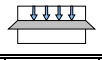
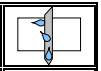
Fonctions	RENFORCEMENT ARMATURE	CONFINEMENT	SÉPARATION	PROTECTION	FILTRE	DRAINAGE
Symbole						
Lettre	R	C	S	P	F	D

TABLEAU DE DECISION

Le tableau ci-dessous permet de sélectionner les fonctions adaptées au phénomène érosif rencontré, toutefois ces fonctions sont liées aux techniques. Le lecteur doit donc déterminer les fonctions qui sont les plus importantes et choisir dans les organigrammes suivants, les techniques à mettre en œuvre.

											
Érosion	Phénomène	μR	mR	MR	C	S	μP	mP	MP	F	D
pluviale	pluie	✓					✓	✓			
	courant ou ruissellement fort	✓	✓		✓	✓				✓	✓
fluviale	batillage			✓	✓				✓	✓	
	marnage – marée									✓	
	courant – jet d'hélice				✓	✓		✓			
littorale	houle			✓	✓				✓	✓	
	marée									✓	
	courant				✓	✓			✓		
éolienne	vent	✓			✓		✓		✓		
anthropique	homme		✓			✓		✓	✓		
	animaux							✓			
	véhicules ou engins		✓	✓		✓		✓			

avec[5]

μ : micro
m : meso
M : macro

[5] Voir I.2.1 Notion d'échelle

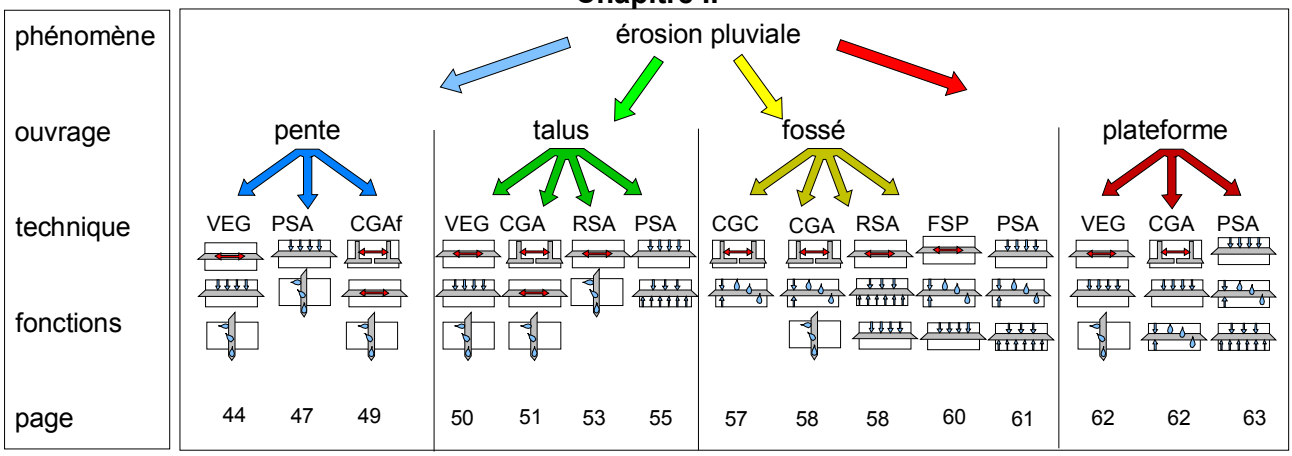
MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI

RAPPEL DES TECHNIQUES

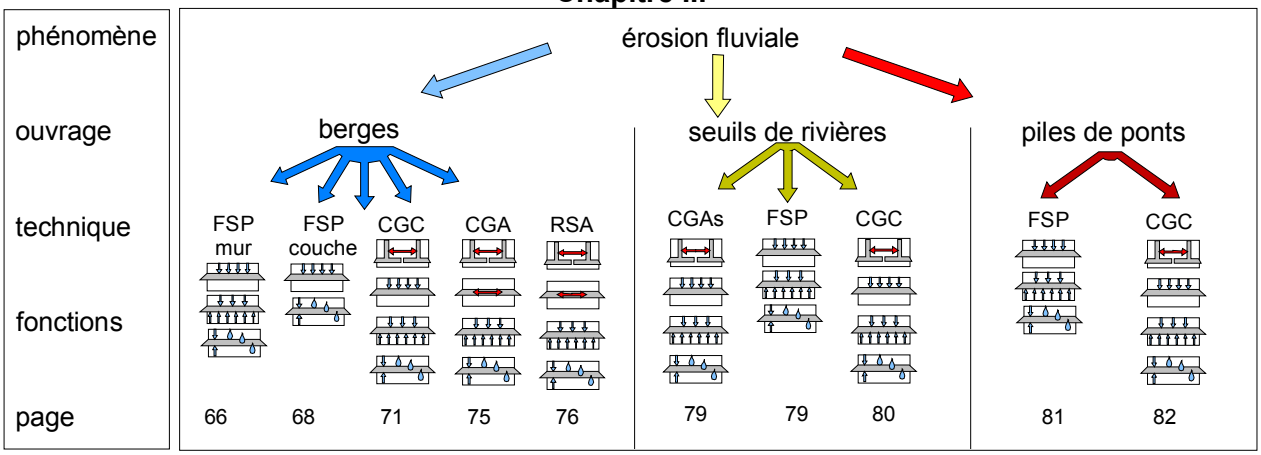
VEG : végétalisation
CGC : système de confinement géoconteneur
CGA : système de confinement géalvéolaire (+f fascinage, +bv brise vent et +s seuil)
RSA : natte de renforcement du sol d'apport
FSP : filtration du sol support sous protection
PSA : géosynthétique de protection du sol d'apport

ORGANIGRAMMES DE CHOIX

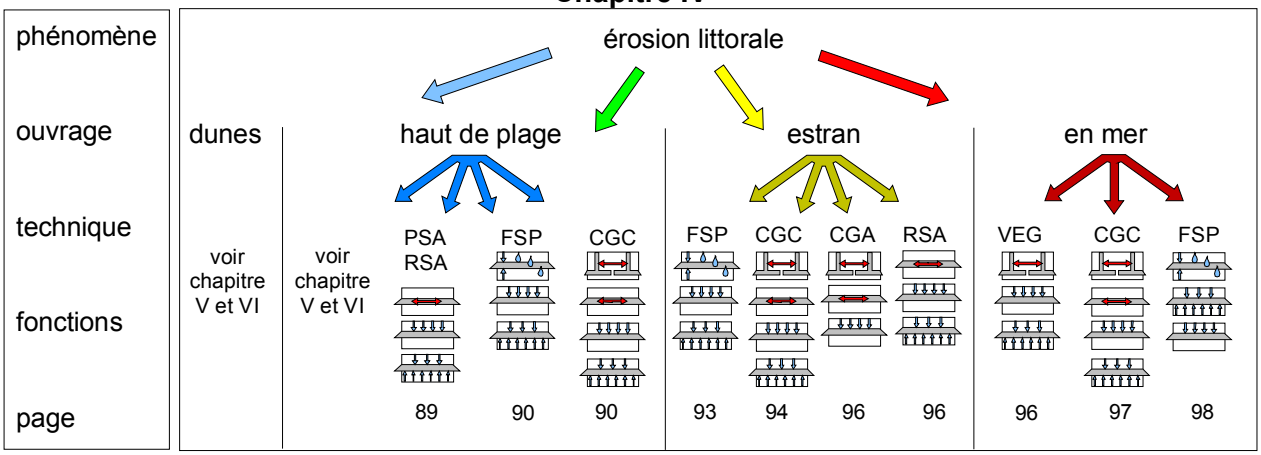
Chapitre II



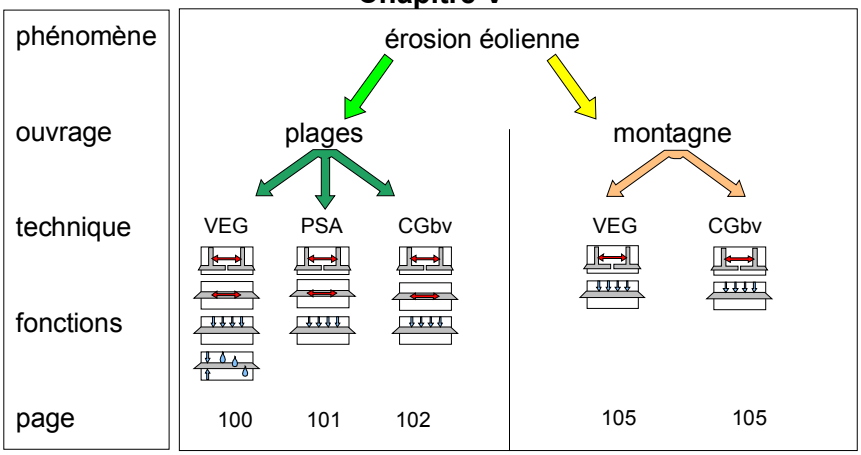
Chapitre III



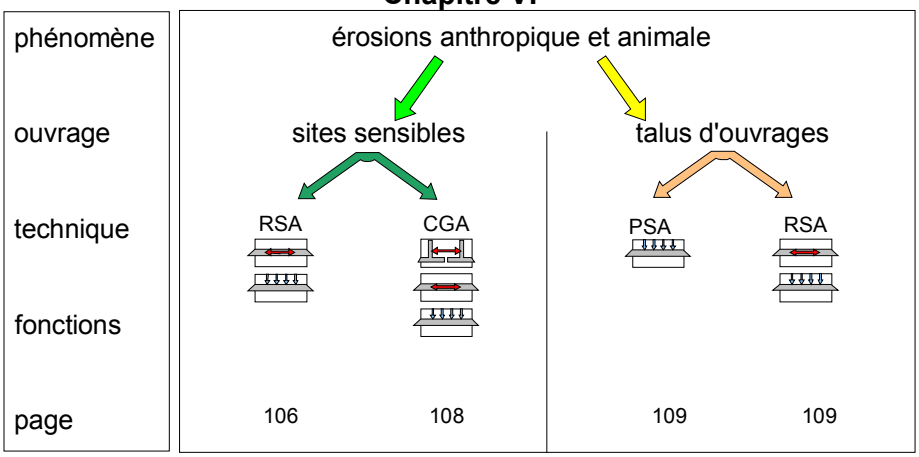
Chapitre IV



Chapitre V



Chapitre VI



MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI - MODE D'EMPLOI

II ÉROSION PLUVIALE

II.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents types d'ouvrage soumis à l'érosion pluviale :

- ➔ pentes naturelles (pentes sans reprofilage),
- ➔ flanc de déblais (pentes avec reprofilage),
- ➔ flanc de remblais,
- ➔ plates-formes et
- ➔ fossés.

L'organigramme ci-dessous permet de faire un choix rapide des techniques (figure II-1). Les symboles des fonctions ont été définis au I.6.1 page 35.

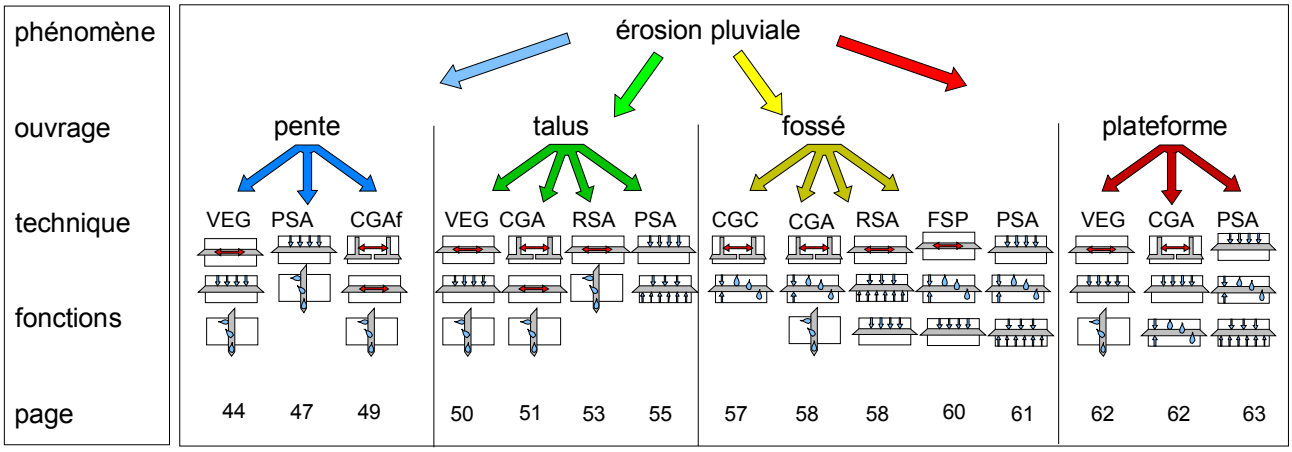


Fig. II-1 Organigramme de choix des techniques

Lors des travaux, les ouvrages en terre (ouvrages existants ou en cours de réalisation) sont des éléments sensibles à l'érosion pour diverses raisons :

- ➔ La nature des matériaux, notamment les sols fins non cohérents,
- ➔ La géométrie de l'ouvrage (pente) et sa réalisation (empreintes pouvant retenir l'eau, …)
- ➔ Le compactage délicat,
- ➔ La sensibilité aux effets climatiques tels que ravinement, gonflement et retrait.

Pour ces diverses raisons, il convient d'apporter un soin particulier dans le choix des matériaux utilisés, dans leur mise en œuvre et dans celle de la terre végétale.

II.1.1 Stabilité sous sollicitation pluviale

Les matériaux fins (cohérents ou non) sont sensibles à l'érosion et doivent être protégés de celle-ci (figure II-2). La mise en place de la protection doit suivre la réalisation de l'ouvrage dans un délai à apprécier en fonction de la situation climatique (saison, vent, pluie, intempéries, …) de la géométrie de l'ouvrage, de son exposition, de la période de réalisation, du trafic de chantier prévu sur l'ouvrage, etc.

Les moyens de protection peuvent aller de la couverture en terre végétale avec engazonnement à l'utilisation de granulats particuliers (grave concassée, cailloux, blocs, enrochements) ou l'emploi d'additifs tels que des géosynthétiques ou des géocomposites.

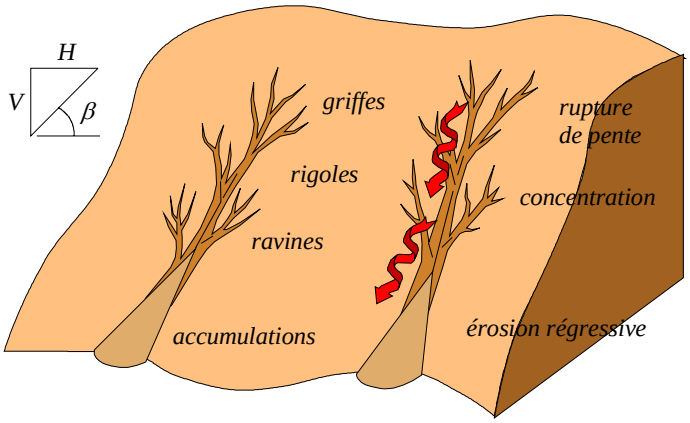


Fig. II-2 Géométrie de talus routiers érodés

Talus H/V	Angle β	Difficulté à lutter contre l'érosion
3/1	18,4°	faible
2/1	26,6°	faible
3/2	33,7°	moyenne
1/1	45,0°	moyenne
1/2	63,3°	forte
1/5	78,7°	très forte
0	90°	à voir

Tableau II-1 Définition des pentes

Lorsque les pentes sont fortes, les matériaux utilisés doivent être frottants avec un angle de frottement très supérieur à la pente du talus. Ainsi comme le montre le tableau II-1 ci-dessus, il ne peut être utilisé des matériaux roulés pour des pentes supérieures à 2/1.
La terre végétale peut présenter des difficultés d'accrochage sur les talus à 3/2.
Au-delà de 3/2 il ne peut être envisagé que l'emploi de matériaux concassés (cailloux, blocs ou d'enrochements) avec une procédure de mise en œuvre bien définie, ou d'additifs géosynthétiques.
Il faut noter que tailler un talus à la verticale dans un matériau cohérent et donc stable est une technique couramment utilisée dans les pays tropicaux. Il ne peut s'agir toutefois d'une solution pérenne.
Les additifs géosynthétiques sont utilisables sur toutes les pentes. Les techniques à base de géomembranes et autres matériaux étanches comme le béton, ne sont pas abordées dans ce guide. On se réfèrera au guide spécifique du CFGG « Bassins ». Toutefois les techniques présentées dans ce guide peuvent trouver leur place sur ces étanchéités et la prise en compte de l'interaction entre les deux techniques est décrite dans l'annexe sur le dimensionnement du présent guide.

Pour un talus naturel ou un ouvrage de génie civil, nous distinguerons deux problèmes mécaniques relatifs à la stabilité sous sollicitation pluviale (figure II-3) ;

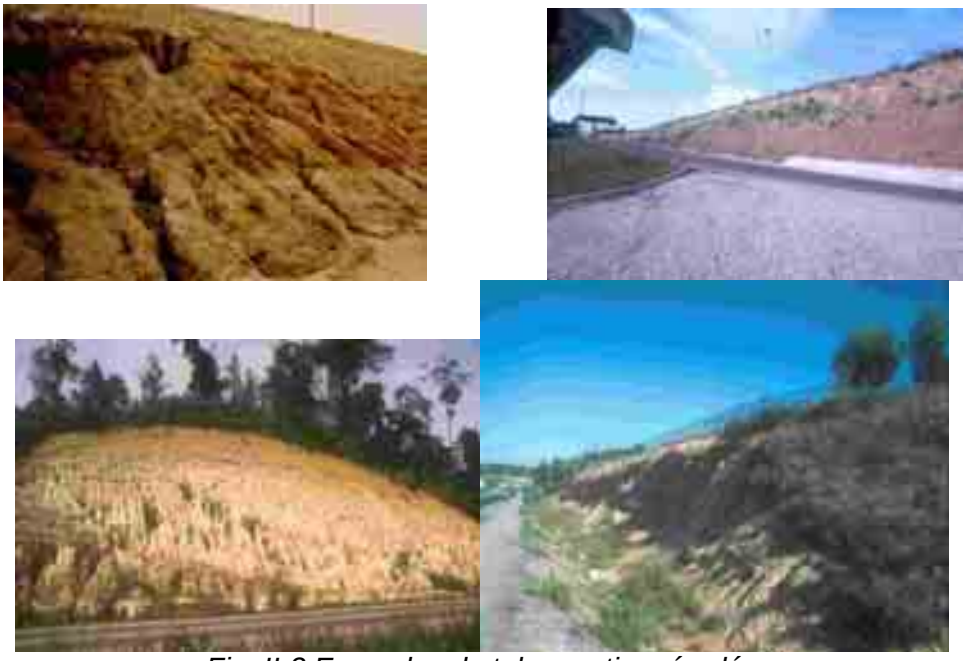


Fig. II-3 Exemples de talus routiers érodés

➔ Le premier est relatif à la stabilisation d'une épaisseur centimétrique de sol sur pente. Nous avons qualifié ce problème au I.2.1 de meso-stabilité pour le distinguer de la macro-stabilité qui concerne la stabilité globale de l'ouvrage en terre.

- ➔ Le second problème est relatif à la stabilité des grains de sol et des graines d'ensemencement en surface face aux sollicitations correspondant à l'érosion pluviale, l'effet d'impact et l'effet du ruissellement. Nous avons parlé alors de micro-stabilité.

Les solutions à préconiser pour stabiliser seront aussi différentes :

- ➔ solutions temporaires et permanentes pour les problèmes de meso-stabilité
- ➔ solutions éventuellement temporaires (avant prise de la végétation) pour les problèmes de micro-stabilité.

II.1.2 Les géosynthétiques et le contrôle de l'érosion pluviale

La végétation constitue pour un talus la protection anti-érosion la plus courante et s'avère généralement efficace. Cependant, même dans le cas où le terrain dispose du substrat permettant le développement de plantes, le processus de végétalisation est un phénomène lent (estimé à un minimum de 2 ans pour consolidation), période pendant laquelle les plantes ne jouent pas efficacement leur rôle de contrôle de l'érosion et même risquent de voir leur croissance compromise par tout incident climatique. Pendant cette période de germination, une couverture de paille, une projection d'émulsion bitumineuse mélangée à des graines ("hydroseeding") facilitent la stabilisation.

L'objectif des géosynthétiques, proposés comme facteur limitant de l'érosion sera donc ;

- ➔ prioritairement de suppléer à la végétation, pendant cette phase préliminaire où le sol est à nu.
- ➔ éventuellement de jouer à plus long terme un rôle équivalent ou complémentaire à la végétation en place.

Les principes de l'érosion pluviale ont été établis plus haut, mais l'optimisation des additifs de structure à la couche superficielle susceptibles de contrecarrer ce phénomène est encore à rechercher.

Quoique déjà très répandue, l'utilisation de géosynthétiques dans ce domaine d'applications reste difficile à évaluer, car d'une part comme on vient de le voir les paramètres influençant l'érosion sont nombreux et éminemment variables d'un exemple à l'autre (peu de comparaisons systématiques avec retour d'expérience sont disponibles) et d'autre part un dysfonctionnement pourra être souvent attribué à une mise en œuvre incorrecte plus qu'à une inadaptation du géosynthétique. Enfin, la diversité des structures synthétiques proposées sur le marché est très grande ce qui ajoute à la dispersion des résultats d'observation accessibles.

II.2 PENTES NATURELLES

Pour l'ouvrage « pentes naturelles » **les solutions sont essentiellement végétales**, puisque le terrain est supposé peu perturbé avec l'emploi éventuel de nattes ou de systèmes de confinement. Cet ouvrage est réputé stable sauf si des chargements nouveaux sont appliqués en tête ou des excavations même temporaires sont réalisées en pied. Dans ce cas, une vérification de la stabilité s'impose (cf. annexe).

II.2.1 Protection végétale (VEG)

La végétation permet d'influer positivement sur la plupart des facteurs inventoriés dans le I.1.1, I.2 et I.3.

- ➔ La végétation intercepte les gouttes et absorbe l'énergie de la pluie. Il y a disparition de l'effet de battance, c'est-à-dire du choc destructeur et explosif des gouttes de pluie sur le sol.
- ➔ La végétation favorise l'infiltration des eaux de pluie en améliorant la porosité et la perméabilité du sol. Cela entraîne une diminution du ruissellement.
- ➔ La végétation retient le sol. Le système racinaire relie, enserre et retient les particules du sol.
- ➔ La végétation ralentit la vitesse du ruissellement. Les tiges et les différents résidus végétaux en surface augmentent la rugosité de surface.

- ➔ La végétation favorise la filtration du ruissellement. Le chevelu végétal entraîne le dépôt des particules les plus grossières transportées par le ruissellement et cela plus près de leur source.
- ➔ Par évapotranspiration la végétation entraîne un abaissement de l'humidité du sol qui peut être sensible dans le volume de sol exploré par les racines. Cet abaissement entraîne une infiltration accrue des eaux de ruissellement et donc moins d'érosion.

Sous un angle plus géotechnique, on peut dire que la végétalisation apporte un renforcement du sol par les racines, ce qui équivaut à une cohésion apparente et que la diminution de la teneur en eau entraîne une augmentation de la résistance au cisaillement du sol.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	+++	++	0	+++	++	0	0	0	+

Fig. II-4 La végétalisation

II.2.1.1 Conditions de mise en œuvre

*** planéité du support**

Le support ne nécessite pas un travail particulier en vue de la végétalisation (figure II-4). Cependant si le substrat est majoritairement minéral, on peut recommander un épierrage sommaire ou un concassage. Une certaine hétérogénéité du support favorise l'installation des plantes (micro reliefs).

*** apport de matériau extérieur**

Dans l'essentiel des cas, l'apport de terre végétale est superflu :

- coût du stockage et de la mise en œuvre
- pente limite d'utilisation suivant la rugosité du terrain (35 à 45 °)
- qualité souvent médiocre: présence d'adventices ou de produits phytotoxiques.

On peut envisager l'apport de mulch ou paillage à base de copeaux de bois, écorces de pins, paillis, fibres de bois, paillette de lin et autres mélanges de cellulose et de lignine. Ils permettent de limiter l'évapotranspiration du sol et favorisent la pousse des semences. Ces produits sont utiles pour leur capacité de rétention d'eau avoisinant 3 à 7 fois leur poids de matière sèche.

*** ensemencement**

Le type d'ensemencement est fonction des surfaces à traiter. En dessous d'un hectare, on préférera le semis manuel en veillant à procéder par geste croisé pour une meilleure couverture et homogénéité du semis. Pour les surfaces importantes le semis se fera par projection hydraulique (hydroseeding) (figure II-5).

Fig. II-5 Le semis par projection hydraulique

Dans la cuve on mélange:

- ➔ les semences, à raison d'environ 20 à 30 g/m².
- ➔ les fixateurs
- ➔ l'engrais
- ➔ l'amendement organique.

Le choix des semences est important ; il tient compte des conditions climatiques et physiques du site et du type de gestion. Le mélange est en général à base de graminées et légumineuses à installation rapide et croissance lente si l'entretien est minimum. Les semences auront des qualités fourragères si l'entretien passe par l'ouverture au pâturage.

*** fixation sur le support**

La fixation du semis dépend du mode d'ensemencement. En semis manuel, on protège rarement le semis si ce n'est quelques rares cas de paillage, pour le semis hydraulique la protection autrefois réalisée par les apports de cellulose est actuellement assurée par des apports d'alginate.

*** facilité de mise en œuvre**

Le semis hydraulique est la technique la plus rapide, la plus complète et la moins coûteuse puisqu'en une seule opération on procède au semis à la protection du semis à l'apport nutritif : avec une cuve de 2000 l, on réalise jusqu'à 5000 m^2. Si le site est difficile d'accès on peut adapter des rallonges à l'engin : 600 m vers le bas, 400 m vers le haut.

II.2.1.2 Conditions de stabilité

*** caractéristique en liaison avec la géométrie**

La pente et la longueur de pente conditionnent l'intensité de l'érosion et donc le choix des techniques de correction.

La végétalisation peut régler les processus d'érosion jusqu'aux pentes fortes à condition que la texture (granulométrie) la structure (sol fracturé ou granuleux) la perméabilité et le compactage soient compatibles avec un bon ancrage des racines. La longueur de pente : au-delà de 10 à 15 m suivant le substrat la végétalisation sera difficile, il faudra mettre en place des systèmes pour briser la vitesse des eaux de ruissellement.

Il est possible d'agir sur la géométrie des zones enherbées. On pourra se référer utilement à la synthèse de M. Guiton (1998). La mise en place de bandes enherbées permet de lutter à la fois contre l'érosion et contre les pollutions des cours d'eau par le ruissellement des matières en suspension.

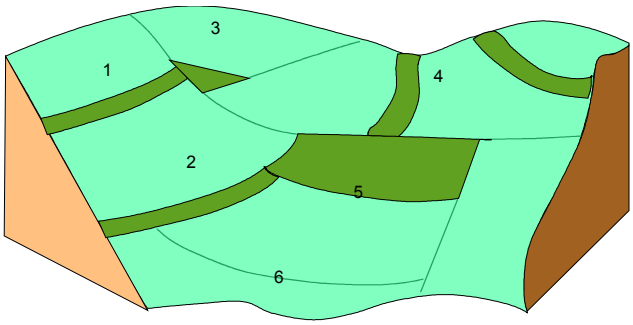


Fig. II-6 La technique de la bande enherbée

La localisation des bandes enherbées répond à plusieurs principes. Elles peuvent être (figure II-6) :

- ➔ en position d'intercepter transversalement le ruissellement diffus au sein de la parcelle, ou en bordure de celle-ci (n°1, 2, 6) : dans ce cas, elles freinent l'eau, retiennent des sédiments et jouent le rôle de diffuseur (limite la concentration de l'eau).
- ➔ en position de canalisation du ruissellement, c'est-à-dire qu'elle est implantée dans l'axe du talweg (n°4). Dans ce cas, elle empêche le décollement des particules terreuses dans la zone déprimée. Elle est positionnée de sorte à guider l'eau vers l'aval sans emporter les sédiments.
- ➔ en position de banquette d'adsorption, de diffusion associant au filtre une dépression aménagée en amont qui exerce un triple rôle ; décantation, infiltration et répartition de la lame d'eau ruisselante sur le filtre provenant de l'amont (n°3 et 5). En limitant le ruissellement à l'amont, on favorise davantage l'infiltration de l'eau.

* **autres facteurs**

Nature du substrat, aire biogéographique, exposition, altitude, choix des mélanges semés.

* **comportement au feu**

Les espèces herbacées qui composent les mélanges semés (graminées et légumineuses) ont une masse aérienne peu importante. Le mode de gestion (fauchage ou pâturage) contribue à ce que le risque en matière d'incendie soit minimum.

II.2.1.3 Conditions relatives à l'entretien

* **fertilisation**

Elle sera fonction du couvert végétal souhaité et de son entretien ultérieur.

* **fauchage**

Fonction des problèmes de sécurité (talus routier: problème lié à la visibilité ou incendie) fonction du choix des espèces semées. On consultera des ouvrages plus spécifiques dédiés à ce sujet (METL, SETRA MEnv, 1989).

* **irrigation/arrosage**

Rarement prévue dans les cas classiques de végétalisation.

* **durabilité**

Le choix du matériel végétal conduit à ce que la végétalisation constitue une couverture herbacée pérenne du sol.

II.2.2 Géosynthétiques de protection du sol d'apport (PSA)

Il s'agit ici de protéger de l'érosion une pente sans réaliser d'apport de terre végétale. Généralement, la fonction de la nappe est de réaliser une protection superficielle contre l'effet de la pluie. Toutefois, une autre application consiste à limiter l'érosion d'un talus infertile qui se délite trop rapidement et qui peut présenter des risques pour une activité humaine. Le géosynthétique est placé en couverture au-dessus du sol ensemencé. Il peut s'agir de bionattes biodégradables ou de géonattes synthétiques pérennes (figure II-7 et 8). L'utilisation de bionattes dépend de la capacité du sol à accueillir la végétation destinée à prendre le relais de la protection.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
Pertinence	0	micro	meso	macro	micro	meso	macro	0	0	+
		++	+	0	0	+++				

Le géosynthétique permet suivant l'application la réduction du transport des fines et/ou des matériaux détachés, la réduction de la vitesse d'écoulement des eaux de pluie et/ou la réduction du taux d'érosion. La toile protège ou retient la surface du sol. Dans le cas d'une maille fine, elle absorbe une partie de l'effet splash de la pluie. Les bionattes contribuent efficacement au stockage des précipitations.

II.2.2.1 Conditions de mise en œuvre

* **planéité du support**

La mise en place d'une bionatte demande à ce que le terrain soit correctement préparé pour que la toile adhère le plus possible au sol. En effet, si la toile n'est pas plaquée sur la pente, après plusieurs saisons, le matériau devient fragile et peut se déchirer s'il a été mis en traction.

La mise en place d'une géonatte est identique, sauf dans le cas des géofilets mis en place sur des talus subverticaux difficiles d'accès. Ceux-ci doivent être cependant plaqués le plus possible sur le

sol support afin de limiter l'énergie cinétique à dissiper lors du détachement ou de la chute d'un bloc.

* **apport de matériau extérieur**

Il n'est pas nécessaire d'apporter de la terre végétale sur le support, mais un minimum de fertilité est nécessaire si l'on désire végétaliser.

Fig. II-7 Géofilet

Fig. II-8 Bionatte

Fig. II-9 Pose de bionatte

* **fixation sur le support**

La natte est posée sur le terrain à protéger et ancrée par des fers à béton recourbés ou des clous. La natte peut être découpée localement si l'on souhaite conserver une végétation existante : arbres, arbustes.

* **ensemencement**

Généralement par hydroseeding (voir fiche précédente), mais dans le cas des géofilets sur pentes fortes, un ensemencement naturel entraîne généralement la végétalisation des sols altérés stabilisés.

* **facilité de mise en œuvre**

La pose de la natte sur une pente faible ne pose pas de problème particulier, il faut simplement s'assurer d'une bonne adhérence entre la toile et le sol (figure II-9).

Dans le cas de la pose sur talus sub-verticaux, la mise en place nécessite l'intervention de personnels spécialisés travaillant en rappel.

II.2.2.2 Conditions de stabilité

* **caractéristique en liaison avec la géométrie**

La natte convient aux pentes forte à très forte. Dans le cas des géonattes sur fortes pentes surplombant des ouvrages ou des chaussées, une justification de la retenue des blocs susceptibles de chuter sur l'ouvrage est nécessaire.

* **comportement au feu**

Sur la toile de jute une végétation herbacée sera rapidement installée, les risques liés à l'incendie sont faibles si la végétation installée est entretenue.

II.2.2.3 Conditions relatives à l'entretien

Les géonattes mises en places sur parois rocheuses ne nécessitent pas d'entretien particulier mais doivent être réparées si des déchirures apparaissent suite à la chute de blocs rocheux.

L'entretien des bionattes est lié à la présence du couvert végétal, car l'objectif est que la toile se décompose progressivement, la stabilité de l'ouvrage étant fonction de la qualité du couvert végétal installé.

* **fertilisation**

Elle sera fonction du couvert végétal souhaité et de son entretien ultérieur.

* **fauchage**

Il est déconseillé lorsque la couverture végétale n'est pas auto-suffisante. Sa fréquence dépend des problèmes de sécurité (talus routier : problème de visibilité ou incendie), fonction du choix des espèces semées.

* **irrigation/arrosage**

Rarement prévue dans les cas classiques de végétalisation.

* **durabilité**

Les bionattes ont généralement une durée de vie de 3 à 5 années selon le milieu et les conditions

climatiques, la protection du sol est assurée alors par une couverture herbacée pérenne.
Les géonattes ont une durabilité supérieure, mais le vieillissement des polymères contitutifs les rend fragiles aux sollicitations dynamiques (chutes de blocs) auxquelles elles sont soumises.

II.2.2.4 Fonctions spécifiques

* **rétention d'eau**

Un des intérêts de la bionatte réside dans son potentiel de rétention d'eau. Elle est capable de stocker directement l'eau grâce aux retenues formées par ses fibres le long du profil, le taux de rétention d'humidité atteint plus de 300 %. Cette eau est restituée progressivement à la végétation.

* **Apport nutritif**

En se décomposant, la bionatte apporte de la matière organique aux plantes.

II.2.3 Système de confinement géoalvéolaire par fascinage (CGAf)

La végétalisation en courbe de niveau résultant de la pose de fascines agit essentiellement sur le ruissellement et le transport des sédiments. Cette végétation a un rôle de soutènement léger de nature biologique utilisé pour la correction de versants sur tout type de terrain (figure II-10). Le choix des espèces (arbustives) à enracinement fort assure aussi une stabilité en profondeur des terrains en pente (voir par exemple Gray et Leiser, 1982 ; Hénensal, 1993). Ce type de végétation joue aussi un rôle drainant (forte évapotranspiration).

Fig. II-10 Fascinage

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	++	0	0	0	0	0	0	++

II.2.3.1 Conditions de mise en œuvre

* **planéité du support**

sans objet

* **apport de matériau extérieur**

Les matériaux utilisés sont des fagots de branches de saules essentiellement (2 à 4 m de long et diamètre 0,25 à 0,40 m) liés ensemble et des piquets en bois ou en fer. On peut aussi utiliser des piquets de saules qui font eux-mêmes boutures.

* **fixation sur le support**

On ouvre une petite terrasse de 0,40 à 0,50 m, on plante des piquets sur le bord aval de la terrasse tous les 0,50 m environ et on appuie les fagots sur les piquets. Une seule hauteur de fagot est mise en place. La fascine est enterrée de manière à ce que les branches soient bien en contact avec le sol pour faciliter la reprise des végétaux et éviter le dessèchement.
L'efficacité du système est accrue en ajoutant des boutures dans l'atterrissement et à travers les fagots. Le battage des pieux peut nécessiter une intervention mécanique.

* **ensemencement**

voir II.2.1

*** facilité de mise en œuvre**

Le problème le plus délicat est l'approvisionnement et le stockage du matériel végétal. Il faut se préoccuper de l'organisation du chantier de telle sorte que le temps de stockage soit réduit au minimum. Une bonne technique de stockage est d'immerger les végétaux en eau courante profonde. Ils peuvent être gardés ainsi plusieurs mois.

II.2.3.2 Conditions de stabilité (figure II-11)

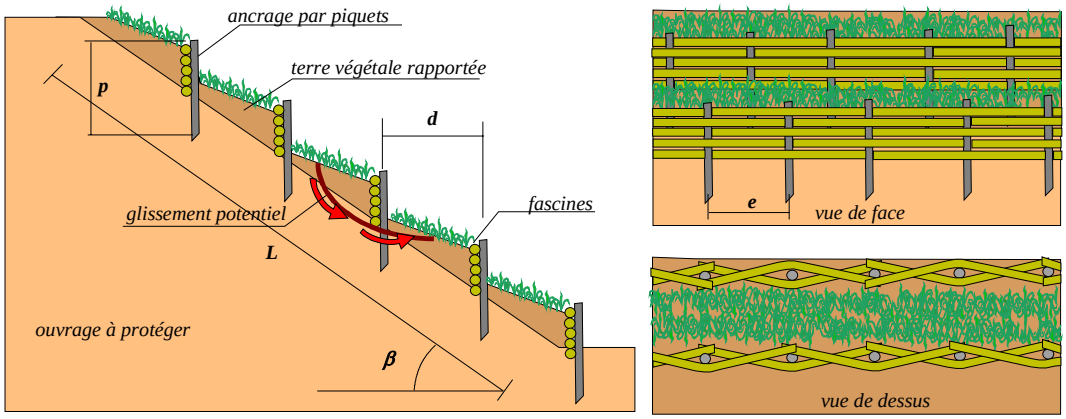


Fig. II-11 Fascinage

Lors d'apport d'une couche de terre végétale, le piquetage sera suffisamment profond (paramètre ***p***) pour limiter les glissements de peau. Une vérification en utilisant les méthodes proposées en annexe X.2 pourra être réalisée.

*** caractéristique en liaison avec la géométrie**

Convient aux pentes fortes à très fortes (cotan(***β***)=1/1 à 1/5) et à longueur de pente (***L***) importante et pour de grandes surfaces. La dimlminution des espacements ***d*** et ***e*** augmente la sécurité.

*** comportement au feu**

L'espacement des fascines (***d***) réduit fortement les risques de propagation de l'incendie.

II.2.3.3 Conditions relatives à l'entretien

*** irrigation/arrosage**

Le terrain doit être relativement frais et meuble pour permettre la reprise des boutures.

*** durabilité**

La fascine est un ouvrage vivant si le taux de reprise est suffisant l'entretien se résume à quelques compléments de bouturages ou de plantations.

II.3 TALUS DE DÉBLAIS ET TALUS DE REMBLAIS

II.3.1 Protection végétale (VEG)

La solution est identique au paragraphe II.2.1, toutefois dans le cas de la mise en place d'une couche de terre végétale sur un talus infertile, les risques de glissement de peau sont importants. Les cycles saisonniers d'humidification sécheresse créent des fissures de retrait où l'eau de ruissellement pénètre diminuant les caractéristiques au niveau de l'interface et initiant l'érosion régressive.

Il est important de noter que la stabilité intrinsèque ou profil d'équilibre dans une structure, du sol rapporté est différente de celle du sol naturel (tableau II-2) :

Tableau II-2 Stabilité du sol d'apport en fonction de la pente

Pente (H/V)	Stabilité du sol d'apport
> 3/2	**Aléatoire**
3/2	**Faible**
2/1	**Moyenne**
3/1	**Elevée**

Les pentes pour lesquelles la stabilité est assurée sont donc bien inférieures à celles des pentes naturelles du II.1.1. Cette remarque est valable pour toutes les techniques présentées dans ce guide.

Le raccordement entre le talus et le terrain naturel (tête et pied de talus) sera réalisé de préférence en arc de cercle et non biseauté pour diminuer la rupture de pente propice à l'érosion. Cette crête de talus fera l'objet d'attentions particulières par la mise en place de fossés limitants le ruissellement provenant de l'amont.

Dans le cas des sols altérables : grès, arènes granitiques et loess, les pentes doivent être minorées, même si le talus est stable, sous peine de glissements de peaux. Dans les sols très fins (argiles et loess) le lissage du talus est nuisible à l'implantation des semences ; un griffage longitudinal est préférable.

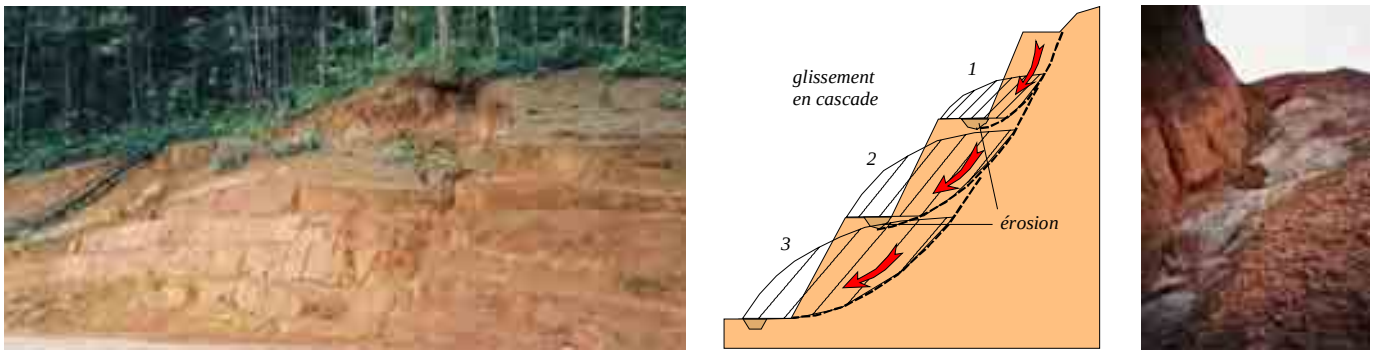


Fig. II-12 Erosion des talus au niveau des risbermes (route N2 , Guyane, 2002)

Dans le cas des talus longs et pentus, il est classique de diviser ceux-ci par des risbermes pour limiter l'impact du ruissellement (Hénensal, 1993). Il est alors nécessaire de prévenir les venues d'eau en pied de talus au niveau des risbermes. En effet, l'érosion du pied et donc la disparition de la butée de pied entrainera généralement des glissements. Cette remarque est particulièrement vraie en zone tropicale où la pratique est de réaliser des talus très pentus pour éviter leur érosion.

II.3.2 Systèmes de confinement géoalvéolaire (CGA)

Il s'agit de géosynthétiques se présentant non pas en nappes mais en alvéoles ou en poches, donc tridimensionnels. La taille de ces cellules de confinement pour le sol peut varier en épaisseur et en largeur. En référence au chapitre II.1.1, leur fonction est essentiellement relative à la meso-stabilité de la couche de surface de quelques centimètres.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	++	0	0	0	0	0	0	+

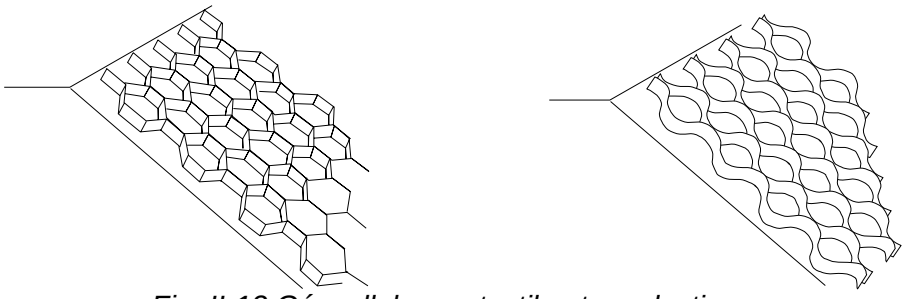


Fig. II-13 Géocellules en textile et en plastique

Une fois rempli, le complexe alvéolaire n'est plus visible si la pente du talus est inférieure à l'angle de talus naturel des matériaux de remplissage. Dans le cas contraire, le sol à l'intérieur prend son profil d'équilibre et découvre les parois amonts des alvéoles à l'image des fascinages présentés au II.2.3 (figure II.11 et Puig et al., 1986). Pour éviter cela, il est alors nécessaire de couvrir les alvéoles par un Géosynthétique de Protection du Sol d'Apport décrit au II.3.4.

II.3.2.1 Conditions de mise en œuvre

*** planéité du support**

Il est certain que les géoalvéoles avec leur matrice de sol confiné présentent une souplesse en

flexion inférieure à celle des nattes par exemple. Leur aptitude à s'adapter à une surface présentant des ondulations est donc faible. D'où l'importance d'un état de surface travaillé en planté avant pose des géoalvéoles, avec aussi élimination des éventuelles traces d'érosion commençante (griffes, rigoles, ravines, ...).

* **fixation sur le support**

La mise en place consiste à déployer la nappe sur le talus à protéger, à l'ancrer en tête de talus, à l'épingler latéralement puis à remplir les alvéoles de matériau. Les panneaux sont généralement liés entre eux par agrafage.

Fig. II-14 Mise en œuvre de géocellules en textile et en plastique

* **apport de matériau extérieur**

Les alvéoles sont remplies sans compactage d'une couche de terre végétale ou de granulats, plus épaisse que la nappe.

* **ensemencement**

Un ensemencement par hydroseeding peut être effectué.

* **facilité de mise en œuvre**

La mise en œuvre s'effectue sans matériel spécifique. Des piquets ou des gros cailloux servent à obtenir la géométrie désirée avant remplissage. Les alvéoles rigides demandent cependant une structure métallique pour maintenir la forme rectangulaire de la nappe.

II.3.2.2 Conditions de stabilité (figure II-15)

* **influence sur le sol**

Les Géoalvéoles empêchent le déplacement de la couche de surface d'épaisseur ***e*** grâce à leur résistance en traction, tangentiellement à la pente. Elles apportent une résistance au glissement (t_s) et l'effort total de glissement (t_c) transmis par le géotextile (t_g), est reprise en ancrage en tête de talus (f_a) ou par micro-clouage ou épinglage périodique dans la pente.

***caractéristique en liaison avec la géométrie**

Pour l'analyse de la stabilité des dispositifs de protection mis en place sur pentes on pourra se référer au guide pour l'étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier (pages 33 à 45 du guide complémentaire) édité par le LCPC et le SETRA en novembre 2000.

Dans ce document sont notamment définis les principes généraux de calcul de la force d'ancrage nécessaire pour assurer la stabilité de la couche de protection en matériau granulaire ou en terre végétale. Le calcul proposé permet notamment le dimensionnement (en résistance à la traction) des géosynthétiques mis en place. Un dimensionnement de l'ancrage en tranchée en tête de talus et de sa profondeur (***p***) est également proposé.

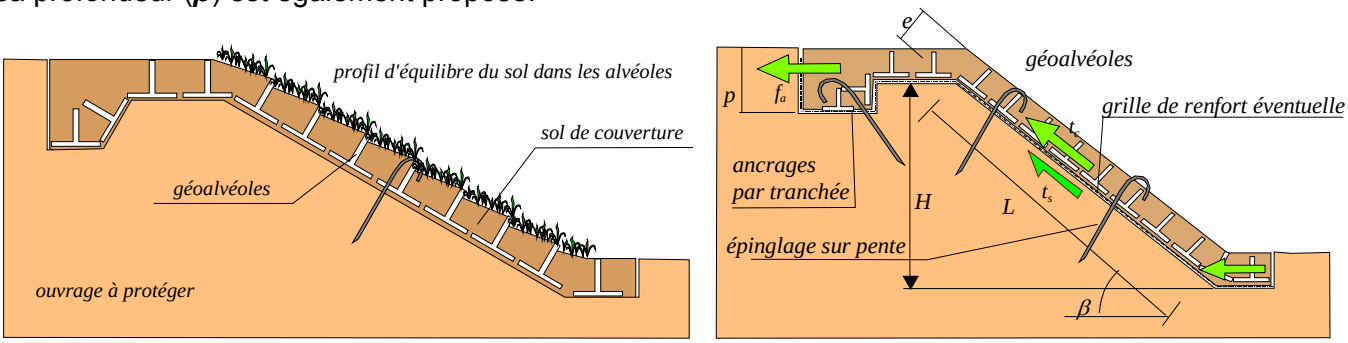


Fig. II-15 Géométrie des pentes recouverte de géocellules

La vérification de la stabilité (cf. annexe X.2) est complétée par celle des liaisons internes (qui donnent la forme aux alvéoles ou aux poches) et inter panneaux. En effet, un chargement trop important peut entraîner une rupture des parois des alvéoles ou des poches. La déchirure se propageant alors dans la nappe.

Sur forte pente (paramètre β), ces complexes peuvent être accrochés à la pente à l'aide de câbles. Cette solution s'utilise lorsque le support est par exemple un béton projeté que l'on désire cacher. Elles peuvent être également renforcées lorsqu'elles subissent de fortes tensions tangentielles par des nappes de grillage métallique en sous-face et/ou en surface agrafées au géotextile à l'aide de crochets spéciaux.

II.3.2.3 Conditions relatives à l'entretien

Généralement ces techniques nécessitent peu d'entretien.

* **Fauchage**

Celui-ci peut être effectué sans problème car la nappe est enfouie. Seule une faible partie sera détruite sans nuire à la résistance de la nappe.

* **durabilité**

Les alvéoles, si elles restent continûment enfouies, sont protégées des dégradations dues aux UV.

II.3.3 Nattes de renforcement de la couche végétalisable (RSA)

Ces "nattes" se présentent en nappes d'épaisseur généralement comprise entre 5 mm et 20 mm, de structure très ouverte, permettant un remplissage aisé en sol et graines de semence.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	++	+++	++	0	0	0	0	+	0	+

Deux familles de produits sont disponibles. La première est constituée par les bionattes biodégradables faites à partir de fibres naturelles comme le jute, le chanvre, le sisal et d'autres. La seconde comprend les géonattes pérennes réalisées à partir de grosses fibres (crins) synthétiques disposées aléatoirement puis liées par un procédé thermique sous forme de grilles souples. Plusieurs grilles à qui l'on impose des ondulations sont assemblées sous forme de nappe. Elles peuvent être également renforcées à l'aide d'une géogrille ou d'un grillage métallique inséré directement dans la nappe à la fabrication en usine en augmentant ainsi la résistance.
Leur structure est très variable: tissés, non-tissés, association par couture ou collage de ces deux types de produits.

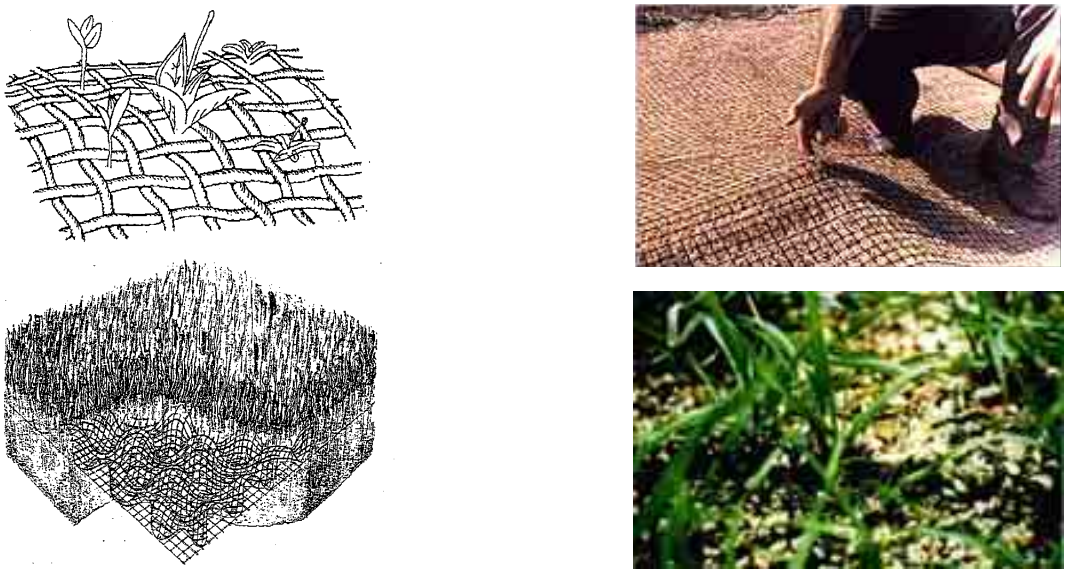


Fig. II-16 Bionatte et géonatte

II.3.3.1 Conditions de mise en œuvre

*** planéité du support**

La qualité de l'interface entre la natte et le sol de base, est fondamentale, si l'on veut éviter écoulement préférentiel et lessivage dans cet espace. Une grande flexibilité des nattes est donc requise.

*** fixation sur le support**

L'épinglage est conseillé pour reprendre les efforts résistants au glissement et pour apporter une force normale propre à plaquer la natte sur son sol support.

*** apport de matériau extérieur**

La structure est remplie de terre végétale sur quelques centimètres (figure II-17 et 18).

Fig. II-17 pose d'une géonatte

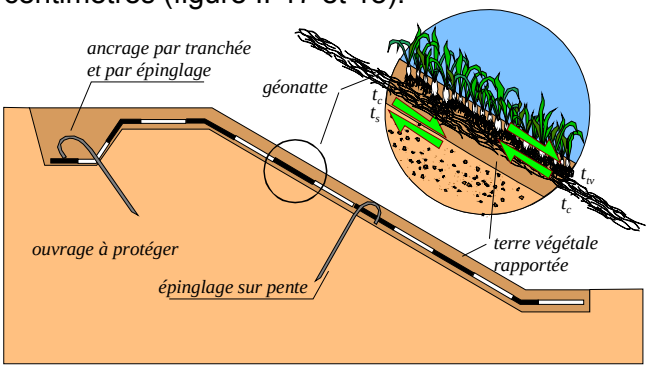


Fig. II-18 pose d'une géonatte

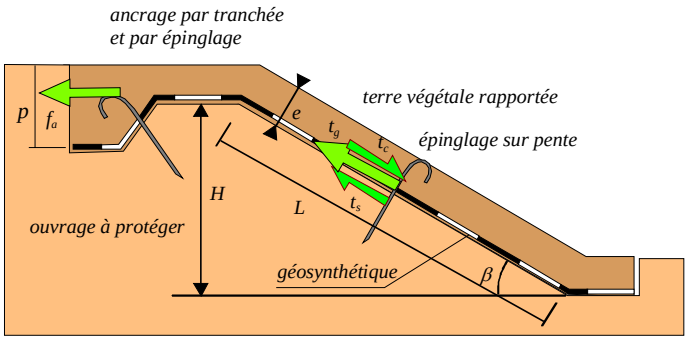


Fig. II-19 Stabilité d'une géonatte

*** ensemencement**

Les semences peuvent être mélangées à la terre d'apport ou projetées par hydroseeding. Certaines nattes peuvent être pré-ensemencées.

*** facilité de mise en œuvre**

Mise en œuvre en rouleau sans moyens spécifiques (figure II-20 et 21).

II.3.3.2 Conditions de stabilité (figure II-19)

*** influence sur le sol**

Comme pour les géoalvéoles, le premier objectif de ces matériaux est de stabiliser la couche de sol de surface d'épaisseur ***e*** (meso-stabilité). Une vérification des efforts de traction sera effectuée (cf. annexe X.2)

*** caractéristique en liaison avec la géométrie**

Cependant ces produits présentent généralement une résistance à la traction bien inférieure à celle des géoalvéoles. Aussi, un simple ancrage en tête (***fa***) reprenant l'effort total de glissement (t_c) transmis par le géotextile (t_g), n'est dans ce cas pas possible à la différence des géoalvéoles sauf pour des talus de faible longueur (***L***) et pente (paramètre β). Un micro-clouage ou épinglage espacé le long de la pente (t_s) qui repartit la reprise de l'effort tangentiel est alors nécessaire.

En cas d'utilisation temporaire, ouvrage non permanent ou temps nécessaire à la prise de la végétation pour un ouvrage permanent, les bionattes peuvent être utilisées. Le problème réside donc d'abord dans l'assurance d'obtenir une végétation stable avant dégradation significative de la bionatte.

II.3.3.3 Conditions relatives à l'entretien

*** Fauchage**

Le fauchage est possible mais de grandes précautions doivent être prises dans les premières saisons car la nappe détruite localement se déchirera.

*** durabilité**

Dans le cas d'un renforcement permanent, il faut s'assurer que le géosynthétique reste couvert par le sol d'apport.

Pour un renforcement temporaire, les bionattes ou géonattes biodégradables, peuvent remplacer partiellement les géonattes synthétiques, comme substitut au tissu racinaire (micro-stabilité). Les

fibres de base sont la jute, la fibre de coco,... La durabilité de la fibre de coco est supérieure à celle de la jute, mais une durée de vie de 2 ans semble un maximum.

Fig. II-20 Géonatte en protection avant recouvrement de terre végétale

Fig. II-21 Végétalisation du talus après hydro-encemencement

II.3.4 Géosynthétiques de protection du sol d'apport (PSA)

La fonction de ces nappes est de confiner une protection superficielle contre l'effet de la pluie (figure II-22). Le géosynthétique est placé en couverture au-dessus du sol ensemencé (figure II-23). Ses ouvertures peuvent être plus petites que pour les Nattes de Renforcement du Sol d'Apport vues ci-dessus, puisqu'il n'y a pas l'opération de mélange sol-fibres, mais elles doivent cependant permettre la croissance des plantes au travers de la nappe.

Fig. II-22 Mise en place d'une bionatte

Différentes structures 2D en polymère ou naturelles peuvent correspondre à cette utilisation; géogrilles ou géofilets, tissés, non-tissés.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
Pertinence	0	micro	meso	macro	micro	meso	macro	0	+	+
		++	0	0	+++	0	0			

II.3.4.1 Conditions de mise en œuvre

* **planéité du support**

Cette planéité est importante car le géosynthétique n'étant pas plaqué au support par une masse de sol, le contact est difficile à obtenir.

* **apport de matériau extérieur**

L'application de ces produits sur un sol infertile ne permettra pas une végétalisation durable, un minimum de fertilité (proportion de terre arable) est nécessaire. Dans le cas d'une bionatte biodégradable, l'apport d'humus de la natte ne peut être considéré comme suffisant.

* **fixation sur le support**

Elle est effectuée par piquetage et doit mettre en contact le géosynthétique avec le sol support.

* **ensemencement**

Effectué avant la pose du géosynthétique.

* **facilité de mise en œuvre**

Pas de matériel spécifique.

II.3.4.2 Conditions de stabilité (figure II-24)

* **influence sur le sol**

Les nappes placées sur le sol le protègent contre l'effet de la pluie. Elles permettent également de conserver une humidité de surface favorable à la pousse de la végétation et susceptible d'éviter les glissements de peau lors de pluies brusques.

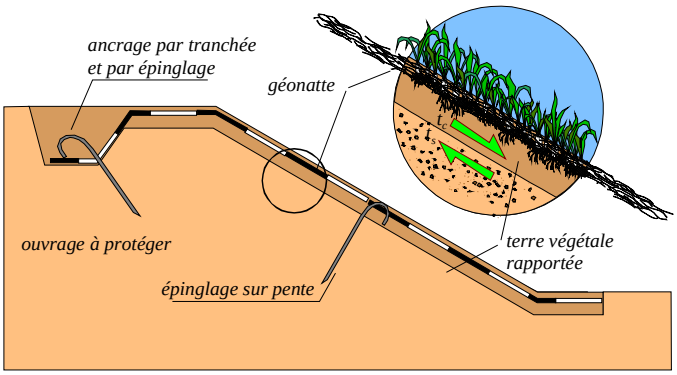


Fig. II-23 pose d'une géonatte

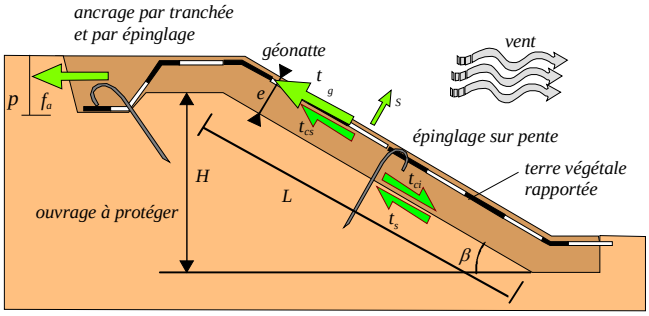


Fig. II-24 Stabilité d'une géonatte

*** caractéristique en liaison avec la géométrie**

Une vérification de la stabilité sera effectuée (cf. annexe X.2). On sera attentif à l'effort total de glissement (t_{ci}) de l'épaisseur de sol (***e***) et à sa reprise par le sol sous jacent (t_s) et la géonatte (t_{cs}). Ces efforts sont fonction de la longueur (***L***) et de la pente (paramètre β) des talus.

Une résistance à la traction dans le plan (t_g) de faible niveau est suffisante, puisque la fonction de meso-stabilité n'est pas requise. Parfois, un simple ancrage en tête (f_a) peut être utilisé.

Un contact intime entre le géosynthétique et le sol support est souhaitable. Ce contact est difficile à obtenir même pour des produits souvent minces et souples, en raison de la légèreté des nappes, accentuée par le fait qu'elles ne sont pas dans ce cas alourdies par des particules de sol incluses, ou sus-jacentes. On vérifiera que le complexe est stable sous la force de soulèvement ***s*** due au vent. Un micro-clouage ou épinglage espacé le long de la pente (t_s) pourra être nécessaire.

II.3.4.3 Conditions relatives à l'entretien

*** Fauchage**

Celui-ci est déconseillé car la nappe sera détruite.

*** durabilité**

La durabilité des fibres naturelles est inférieure à deux ans.

II.4 FOSSÉS

La plupart des ouvrages de génie civil intègrent des fossés pour collecter les eaux de pluie ruisselant sur l'ouvrage et les évacuer vers un exutoire. On peut énumérer :

- ➔ Les autoroutes, boulevards périphériques, voies rapides, routes nationales et routes départementales (figure II-26). Ce sont des chaussées recevant un trafic moyen à fort,
- ➔ Les chemins communaux et routes forestières (ces chaussées reçoivent un trafic faible à très faible),
- ➔ Les pistes d'aéroport et les voies ferrées.

Pour ces différents ouvrages la géométrie du fossé est caractérisée par une géométrie standard qui rapproche le problème de celui d'un canal de section trapézoïdale à surface libre (figure II-25). La création de plis ou diguettes pour retenir l'eau, au moins temporairement, de manière à limiter les débits de pointe en aval et provoquer la sédimentation des matières en suspension peut s'avérer intéressante. La technique consiste à créer des obstacles d'une hauteur décimétrique, pour diminuer les longueurs de ruissellement. **Ces ouvrages appelés « seuils » sont abordés dans le chapitre III.3 « seuils en rivière ».**

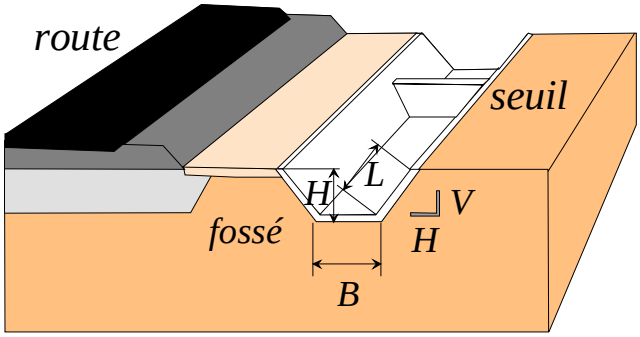


Fig. II-25 Géométrie d'un fossé

Fig. II-26 Ensemencement spécifique d'un fossé

Il est important de noter que l'entretien projeté interagit beaucoup avec le dimensionnement. En effet, l'évolution lors de la vie de l'ouvrage de, par exemple, l'engazonnement, la sédimentation, influence le débit du fossé.

Les solutions possibles de protections de surface sont nombreuses que ce soient des protections inertes ou végétales. Citons d'abord les solutions qui ne s'appliquent pas pour ce type d'ouvrages :

- géofilms,
- géomesh (fibre courte),
- agro textiles,
- fascinages.

Les différentes solutions envisageables sont répertoriées par ordre de « lourdeur ». Elles sont concurrentes de plusieurs solutions traditionnelles de type : béton projeté ou béton coulé en place, géométrie spécifique et végétation spécifique. Ce choix est en partie à justifier vis-à-vis du rôle que joue le fossé dans le transfert des pollution des eaux de ruissellement des chaussées vers les bassins de sédimentation (Legret, 2001).

Lorsque la technique utilisée est complétée par une végétalisation, la pente doit être faible (<5%). L'enherbement est assuré en semant une graminée résistant bien au déchaussement, à une densité plus élevée que pour une végétalisation (40kg/ha). Il est réalisé à une période ou l'herbe poussera rapidement (de mai à juin et fin aout à début septembre). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des mélanges de Ray-Grass et de fétuque rouge traçante.

II.4.1 Systèmes de confinement géoconteneurs (CGC)

Ce système est assez lourd et convient pour des fossés de dimensions importante (figure II-27 et 28). Il est mis en œuvre quand un courant important fait courir des risques à un revêtement poids constitué d'enrochement. On fera attention à la mise en place de seuils pour contrôler la vitesse du courant.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	Meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	+	+	++	0	+

II.4.1.1 Stabilité

Pour les cas spécifiques, on se reportera au III.2.3.

- Évite le transport du sol en place.
- Traction dans le produit pour les pentes (H/V<2/1) à vérifier.

II.4.1.2 Mise en œuvre

- Planéité parfaite des supports requise.
- Les conteneurs doivent être remplis de sol ou de béton ou de cailloux.
- Fixation en tête de fossé par piquets si nécessaire.
- Mise en œuvre lente.

Fig. II-27 Protection des fossés par géoconteneur de type matelas

II.4.1.3 Entretien

- Bonne durabilité.
- Curage délicat.

II.4.2 Systèmes de confinement géoalvéolaire (CGA)

Ce système anti-érosion constitué de blocs en pavé modulaire béton est lourd et donc d'application peu courante car spécifique. Le projeteur doit trouver un juste milieu entre le système très rigide et insensible à l'érosion qui va se trouver déchaussé par une accélération du flux et le système très sensible qui va subir l'érosion.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	++	0	0	++		0	0	+

II.4.2.1 Stabilité

Pour les cas spécifiques, on se reportera au III.2.4.

- Fixe et protège le sol contre l'érosion.
- Faible pente des talus (H/V<3/2).

II.4.2.2 Mise en œuvre

- Planéité parfaite des talus requise.
- Mise en œuvre délicate.
- La mise en œuvre se fait avec un engin de levage.

II.4.2.3 Entretien

- Cette technique ne permet pas la fixation de végétation.
- Le curage est très aisé.
- Réfection possible.

II.4.3 Nattes de renforcement de la couche végétalisable (RSA)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	0	+++	0	++	0	0	++	+	0

II.4.3.1 Nattes à petites mailles (bionattes biodégradables ou géonattes synthétiques)

Ces techniques, lorsqu'elles incluent des géonattes, peuvent présenter un mauvais aspect esthétique si elles ne sont pas recouvertes de terre végétale ou de matériau de couverture (figure II-29). Dans le cas des bionattes, ces techniques disposent d'un bon aspect esthétique lié au caractère naturel du matériau et d'une rétention d'eau sur les talus, favorable à la végétalisation (figure II-28).

Fig. II-28 Protection des fossés par bionatte

Fig. II-29 Protection des fossés par géonatte autoroute A83

II.4.3.1.a Stabilité

Pour les cas spécifiques, on se reportera au III.2.5.
Ces nattes évitent le transport du sol en place.
La traction dans le produit pour les pentes (H/V>4/3) est à vérifier. On pourra utiliser les piquets de maintien dans la justification si ceux ci sont dimensionnés en conséquence.

II.4.3.1.b Mise en œuvre

La mise en œuvre est rapide et l'ensemencement possible.
- La planéité parfaite des supports est requise.
- La natte peut être laissée libre ou recouverte de terre végétale sur une épaisseur centimétrique. On se limitera à quelques centimètres afin que le système racinaire se fixe au géosynthétique.
- Une fixation en tête de fossé est réalisé avec des piquets ou une tranchée d'ancrage.

Si deux bandes sont mises en place pour couvrir la totalité de la largeur du fossé, on liera celles-ci par couture plutôt que recouvrement.

II.4.3.1.c Entretien

- Permet la fixation de végétation et l'enracinement.
- Fauchage possible.
- Curage aisé lorsque recouvert, délicat sinon.
- Réfection aisée.

II.4.3.2 Nattes à grandes mailles (filets géojutes ou filets synthétiques)

Mêmes remarques que pour les nattes à petites mailles.

II.4.3.2.a Stabilité

Pour les cas spécifiques, on se reportera au III.2.5.
- Ces nattes n'évitent pas le transport du sol en place.
- La traction dans le produit pour pente (H/V>3/2) est à vérifier.

II.4.3.2.b Mise en œuvre

La mise en œuvre est rapide et l'ensemencement possible.
- La planéité parfaite des supports est requise.
- Le géonet doit être recouvert de terre végétale sur 5 à 10 cm.
- La fixation en tête de fossé est effectuée par piquets ou tranchée d'ancrage.

II.4.3.2.c Entretien

- Veiller à la bonne pousse de la végétation pour les bio-dégradables.
- Permet la fixation de végétation et l'enracinement.
- Fauchage possible.
- Curage délicat.

II.4.3.3 Roving (fibre longue)

Cette technique consiste à répandre des fils sous voie pneumatique à la surface du sol puis à projeter un liant hydrocarboné pour lier les fils. Cette technique revient à réaliser la géonatte sur le chantier. Elle bénéficie d'un bon aspect esthétique mais est d'application peu courante car spécifique.

II.4.3.3.a Stabilité

- Faible pente des talus (H/V<3/2).
- Veiller à l'accrochage.

II.4.3.3.b Mise en œuvre

La mise en œuvre manuelle est longue et délicate.

- La planéité parfaite des talus est requise.
- Cette technique nécessite des engins spécifiques pour la mise en œuvre.
- L'ensemencement est recommandé.

II.4.3.3.c Entretien

- Veiller à la bonne pousse de la végétation.
- Permet la fixation de végétation et l'enracinement.
- Fauchage possible.
- Curage délicat.

II.4.4 Filtration du sol support sous protection (FSP)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	Meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	0	+++	0	++	0	0	+	++	0

II.4.4.1 Nattes à petites mailles (bionattes biodégradables ou géonattes synthétiques)

La natte est protégée par un matériau de couverture (figure II-30). Il est probable que les blocs retiendront une partie des matières en suspension qui génèreront une végétalisation naturelle.

Cette végétalisation indigène aura d'autant plus de chance de s'établir si le courant est faible. De ce fait, cet ouvrage nécessitera un entretien qui n'est pas facilité par la présence des blocs.

Fig. II-30 Protection des fossés par bionatte

II.4.4.1.a Stabilité

Pour les cas spécifique on se reportera au III.2.2.

Évite le transport du sol en place.

La traction dans le produit pour les pentes (H/V>4/3) est à vérifier. On pourra utiliser les piquets de maintien dans la justification si ceux-ci sont dimensionnés en conséquence.

II.4.4.1.b Mise en œuvre

- La planéité parfaite des supports est requise.
- La natte est recouverte de blocs.
- Fixation en tête de fossé par piquets.

Si deux bandes sont mises en place pour couvrir la totalité de la largeur du fossé, on liera celles-ci par couture plutôt que par recouvrement (figure II-31).

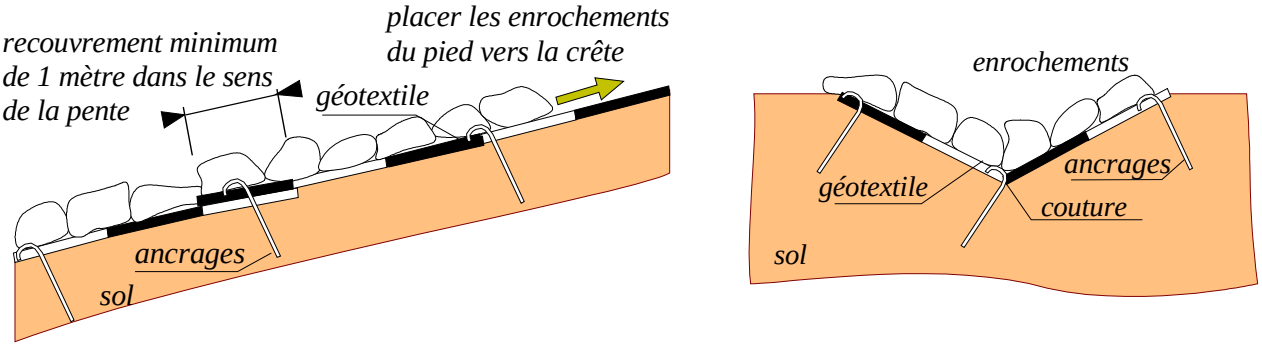


Fig. II-31 Mise en œuvre dans le cas d'un recouvrement par enrochement

La mise en œuvre est rapide.

II.4.4.1.c Entretien

- Le curage est aisé lorsque le geosynthétique est recouvert mais il est susceptible d'abîmer le filtre. Lorsque le géosynthétique est non recouvert, le curage est délicat.
- La réfection est aisée.

II.4.5 Géosynthétiques de protection du sol d'apport (PSA)

II.4.5.1 Géomembranes synthétiques

Cette technique entraîne l'étanchéité complète du fossé, mais possède un aspect esthétique faible. Cependant, il existe des nattes d'accroche de terre et de végétation sur géomembrane qui permettent de recouvrir celle-ci sans risque de glissement à l'interface (note de calcul nécessaire au dimensionnement du produit à installer dans chaque cas de figure).

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	0	0	0	0	+++	++	+++	0	0

II.4.5.1.a Stabilité

- Empêche le transport du sol en place : étanchéité.
- Agression de la géomembrane en tête de talus (concentration de contrainte).
- Sensible au feu.

II.4.5.1.b Mise en œuvre

- Planéité parfaite des supports requise.
- La géomembrane ne doit pas être recouverte de terre végétale seule du fait de la mauvaise tenue prévisible.
- La mise en œuvre est lente (soudure sur place).

II.4.5.1.c Entretien

- Sensible suivant le type à la dégradation due aux UV solaires.
- Sensible au vandalisme.
- Ne permet pas la fixation de végétation.
- Curage délicat.
- Réfection possible (pièces rapportées).

II.5 PLATE-FORMES

Les plate-formes sont moins sensibles à l'érosion pluviale que les ouvrages cités précédemment. Le souci essentiel est l'évacuation des eaux de pluie qui nécessite de légers pendages susceptibles de faire apparaître une légère érosion par la création de chemins préférentiels.
Les plate-formes sont généralement créées pour être opérationnelles et sont, de ce fait, le plus souvent revêtues pour assurer leurs fonctions (figure II-32).

Fig. II-32 Protection de plate-forme

Pour les plates-formes non revêtues, les moyens d'actions sont de favoriser l'infiltration ou de diminuer l'impact des gouttes. Favoriser l'infiltration consiste à limiter le compactage et les empreintes de roues car l'un comme l'autre, ils font obstacle au drainage interne et favorisent l'apparition d'excès d'eau et en surface. Ils entraînent la formation d'une croûte de battance résistante à l'incision par l'eau, ce qui augmente et concentre le ruissellement en bordure de ces zones compactées. Cette solution est cependant peu en accord avec les conditions de chantier et l'on s'orientera vers les solutions de protection de surface qui sont de deux types possibles:

- ➔ des protections végétales,
- ➔ des protections inertes.

Les protections inertes peuvent être végétalisables ou non végétalisables. C'est à la fois le critère de capacité de végétalisation et celui du poids de la protection à mettre en œuvre par unité de surface qui permettent de différencier les différentes protections. En effet, le taux de couverture doit dépasser 30% pour réduire de façon significative la concentration des eaux de ruissellement.
On distingue parmi les protections possibles celles utilisant des géosynthétiques :

- ➔ Les protections perméables légères végétalisables,
- ➔ Les revêtements perméables lourds végétalisables,
- ➔ Les revêtements perméables lourds non végétalisables,
- ➔ Les protections totales par imperméabilisation non végétalisables.

II.5.1 Protection végétale (VEG)

Certaines surfaces, bien que peu végétalisées, ne sont pratiquement pas érodables lorsque le pourcentage de fines est très faible. Les autres surfaces non végétalisées sont toutes plus ou moins érodables. La protection des surfaces avec des couverts végétaux est alors très efficace contre l'érosion. Il convient donc de conserver au maximum la végétation existante et de retarder son enlèvement avant travaux.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	0	++	0	+++	0	0	0	0	+

Les sols recouverts d'une couche de terre végétale d'une épaisseur d'au moins 10 cm sont généralement végétalisables parce que cette couche renferme le plus souvent une quantité minimum d'éléments nutritifs. Mais ce n'est pas le cas pour les sols fins bruts découverts par les terrassements ou l'érosion naturelle. Dans ces cas, on peut apporter une épaisseur de terre végétale que lorsque la pente est suffisante pour provoquer le ruissellement. On peut également utiliser des nattes ou des géotextiles pré-ensemencés.

II.5.1.1 Mise en œuvre, stabilité, entretien, fonctions spécifiques des solutions

Identique au II.2.1

II.5.2 Systèmes de confinement géoalvéolaire (CGA)

La réalisation d'une protection perméable lourde végétalisable peut s'effectuer à partir :

- ➔ des mélanges boueux avec fils ou grillages.
- ➔ des géosynthétiques tridimensionnels alvéolés.
- ➔ des pavés de béton fixés sur géotextiles.

Ces deux dernières solutions sont intéressantes pour l'apport de carrossabilité.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	+	++	++	+	+	0

II.5.2.1 Conditions de mise en œuvre

* **planéité du support**

Les défauts de planéité du sol support dans ce cas sont généralement rattrapés par la mise en place gravitaire de la protection.

* **apport de matériau extérieur**

La structure peut être remplie de terre végétale sur quelques centimètres. L'apport de matériaux extérieurs n'est pas toujours nécessaire.

* **fixation sur le support**

La fixation sur le sol support n'est pas nécessaire. On peut envisager de faire pénétrer par des moyens lourds la structure alvéolaire dans la plate-forme pour assurer sa stabilisation superficielle.

* **facilité de mise en œuvre**

La mise en œuvre est aisée. Mise en œuvre par rouleaux ou plaques.

II.5.2.2 Conditions de stabilité

* **influence sur le sol**

Les nappes sont placées sur le sol et le protègent contre les effets de la pluie.

* **caractéristique en liaison avec la géométrie**

Le contact entre le géosynthétique et le sol est assuré par gravité ou par poinçonnement à la mise en œuvre quand on veut l'enfouir.

Le géosynthétique n'assure pas de fonction de méso-stabilité.

II.5.2.3 Conditions relatives à l'entretien

***durabilité**

La durabilité est fonction de l'activité envisagée sur la plate forme.

II.5.3 Nattes de protection du sol d'apport (PSA)

Les protections perméables légères végétalisables peuvent être :

- ➔ Les filets, les nattes et paillassons.
- ➔ Nappes tridimensionnelles.
- ➔ Film de paillage autour ou entre les plants.
- ➔ Géogrilles et grillages ancrés.

On notera que l'absence d'enfouissement limite la décomposition.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+	0	0	0	+	+++	++	+	+	0

II.5.3.1 Conditions de mise en œuvre

* **planéité du support**

voir II.5.3.1

* **apport de matériau extérieur**

voir II.5.3.1

* **fixation sur le support**

voir II.5.3.1

* **facilité de mise en œuvre**

voir II.5.3.1

II.5.3.2 Conditions de stabilité

* **influence sur le sol**

voir II.5.3.2

* **caractéristique en liaison avec la géométrie**

voir II.5.3.2

II.5.3.3 Conditions relatives à l'entretien

***durabilité**

voir II.5.3.3

III ÉROSION FLUVIALE

III.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES

L'érosion fluviale intéresse différents types d'ouvrages (figure III-1):

- ➔ les berges de rivières,
- ➔ les seuils de rivière,
- ➔ Les piles de ponts,

mais les rives de cours d'eau et de plan d'eau relèvent de la même problématique.

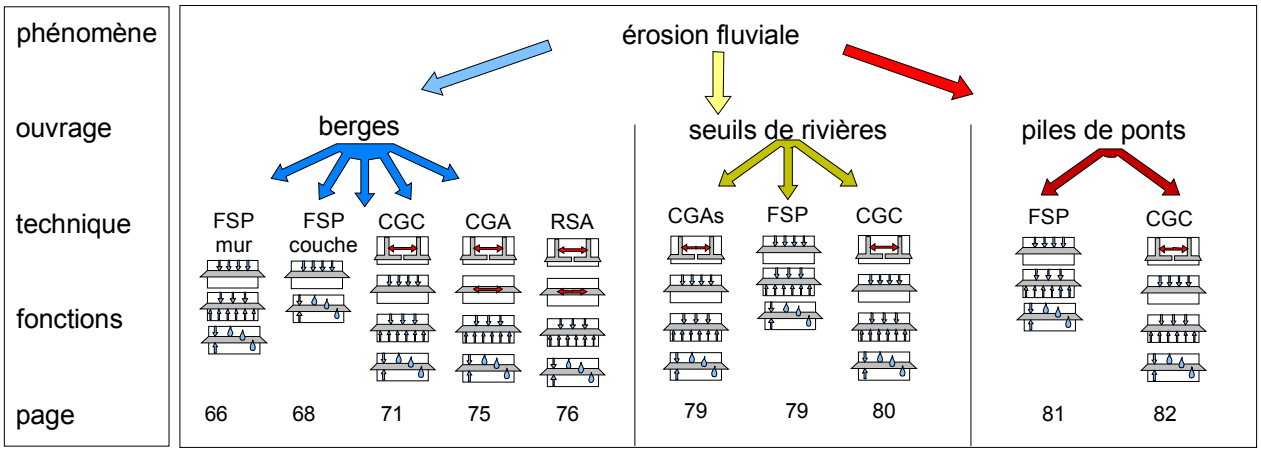


Fig. III-1 Organigramme de choix

Les différentes techniques et leur aptitude à remplir les fonctions de lutte contre l'érosion fluviale ont fait l'objet d'expérimentations en vraie grandeur par le CETMEF (Centre d'Etudes Techniques Maritime Et Fluvial ex STCPMVN Service technique central des Ports Maritimes et Voies Navigables) et VNF (Voies Navigables de France) et sont le sujet de plusieurs publications (Fagon et al., 1997 ; 1999). Les paragraphes suivants intègrent les enseignements tirés de ces expériences.

III.2 BERGES DE VOIES NAVIGABLES, DE COURS D'EAU ET DE PLANS D'EAU

La conception d'un dispositif de protection de berges nécessite une démarche préalable de diagnostic qui vise **la connaissance parfaite des mécanismes en jeu** et la prise en compte du problème de l'érosion dans son ensemble. Une érosion ne se développe sur un site que si l'intensité de la sollicitation qui s'applique à la berge est supérieure à la contrainte de résistance admissible par le sol ou la protection en place.
Cette phase initiale indispensable repose donc sur la détermination des sollicitations qui s'exercent sur la berge et sur l'évaluation des capacités de la berge à y résister.

Il faut notamment effectuer **un recensement des phénomènes hydrauliques naturels ou engendrés par la navigation**, et déterminer les grandeurs caractéristiques correspondantes.

Tableau III-1 Caractérisation des phénomènes

Phénomènes	Caractéristiques
Courants	Vitesses, sens, directions, fréquences
Vagues	Hauteurs, périodes et longueurs d'ondes
Variations du niveau du plan d'eau	Amplitude, durée, fréquence, vitesse de variation

Une fois ces sollicitations identifiées et quantifiées, elles doivent être localisées sur un profil de berge (figure III-2).

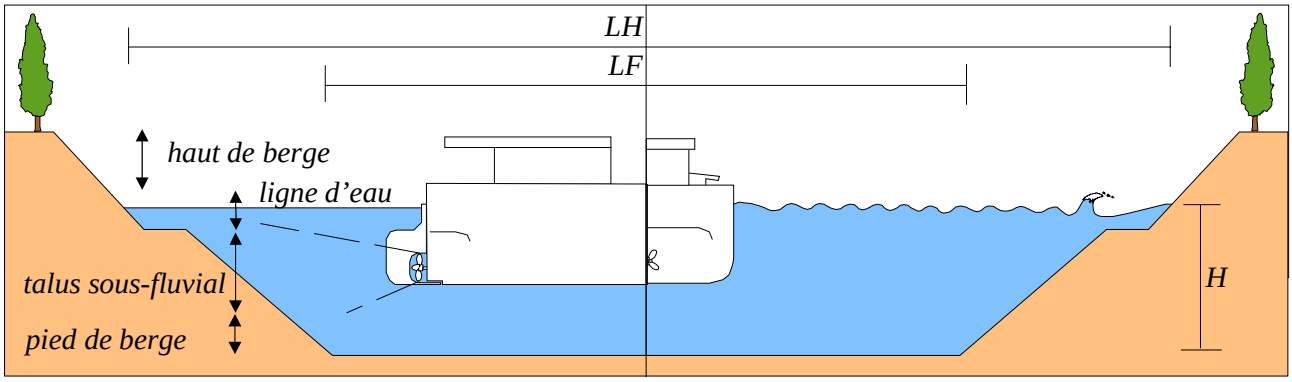


Fig. III-2 Localisation des zones

La caractérisation des paramètres géotechniques et granulométriques des différents matériaux constitutifs de la berge sujette à une érosion fluviale constitue également une phase importante du diagnostic et du recueil de données. Parallèlement à cette analyse, les différents mécanismes de rupture du sol seront identifiés et étudiés au regard des caractéristiques du sol en place ou de la protection projetée.

A l'issue de cette analyse les solutions techniques envisageables sont définies en tenant compte des fonctions réelles que le dispositif de protection devra assurer en place : soutènement, étanchéité, protection contre l'érosion.

Dans l'utilisation de chacune des techniques à sa disposition, le technicien chargé de la définition du système de protection contre l'érosion fluviale des berges devra distinguer nécessairement deux niveaux de conception :

- ➔ une conception globale de l'ouvrage qui devra assurer une ou plusieurs des fonctions principales (Soutènement - Étanchéité - Protection contre l'érosion),
- ➔ une détermination (et donc un dimensionnement) des éléments fonctionnels assurant un rôle essentiel dans le bon comportement de l'ouvrage en service.

Ne seront décrits dans les paragraphes qui suivent que les ouvrages de protection ayant recours à l'emploi des géosynthétiques. Seront donc exposés

- les principes de fonctionnement de chaque catégorie d'emploi des géosynthétiques **filtration, séparation et conteneur,**

- les recommandations concernant leur dimensionnement, leur mise en œuvre et l'entretien,

- les différentes familles de produits, illustrées par des photos et schémas de réalisations en service.

Nous proposons dans le tableau ci-dessous un classement des différentes techniques de défenses de berges où nous avons fait ressortir en grisé les techniques incluant des géosynthétiques (tableau III-1).

Tableau III-2 Techniques incluant des géosynthétiques

Berges géotechniquement instables	**Berges géotechniquement stables**		
Soutènement à assurer	**Protection par confinement du sol**	**Protection par renforcement de surface***	**Protection de surface**
Palplanches	Cuvelages bétons	Nattes	Nattes
Murs maçonnés ou en béton	Perrés maçonnés ou en béton	Nappes alvéolaires	Plantation
Murs poids en gabions	Enrochements liaisonnés		Ensemencement
Tunages	Enrochements libres		
Fascinages	Pavés bétons		
Clayonnages	Conteneurs		

* systèmes perméables à la végétation

Nous allons présenter les techniques géosynthétiques suivant ce classement :

1. Dans le cas où la berge est instable, le géosynthétique sert à la filtration du sol support à l'arrière d'une protection ou d'un ouvrage de soutènement. La stabilité géotechnique des berges est définie en annexe X.2.
2. Dans le cas où la berge est stable, le géosynthétique sert à la filtration du sol support sous une couche de confinement ;
3. Le géosynthétique contient une structure de protection ;
4. Il sert de renforcement et de protection de surface.

III.2.1 Filtration du sol support à l'arrière d'une protection ou d'un ouvrage de soutènement (FSP mur)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	+	+	0	0	0	0	++	+++	+

III.2.1.1 Principes de fonctionnement du dispositif global de protection

Des raisons d'emprise, de stabilité géotechnique ou de fonction du terre-plein, peuvent conduire une protection de berge à assurer la fonction d'ouvrage de soutènement.

Pour toutes hauteurs de soutènement (en rivières et en canaux tous gabarits) :

La solution du mur poids en gabions est envisageable et s'effectue selon un calcul classique de mur poids : poussée des terres et résistance de l'ouvrage par son poids propre (cf. annexe X.2). Comme pour les protections par couche, il est nécessaire de placer un filtre à l'interface gabions/sol. Le filtre granulaire est impossible à mettre en œuvre du fait de la verticalité du dispositif. On a donc recours à un filtre géotextile (figure III-3).

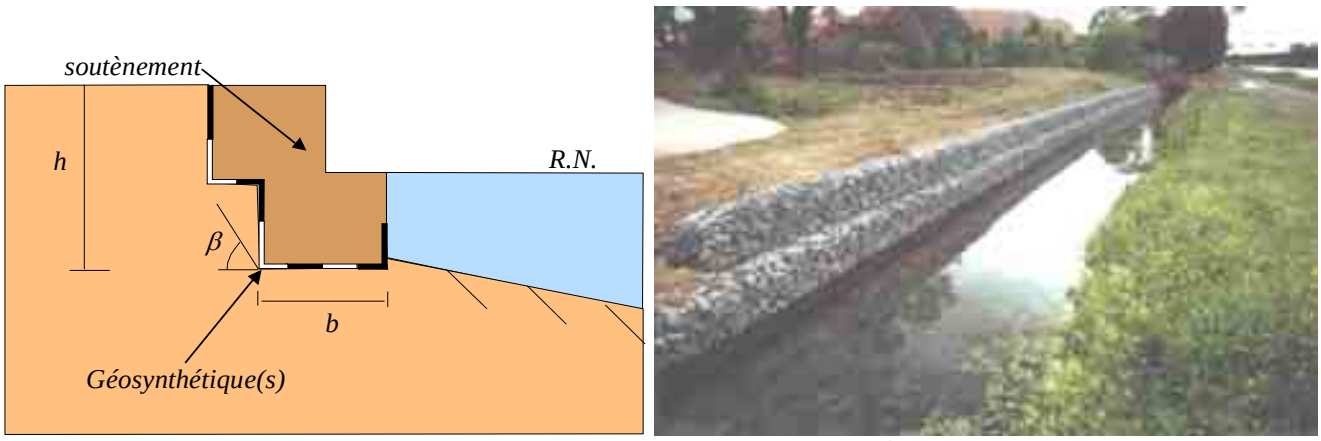


Fig. III-3 Protection de berge en gabion métallique

Il convient dans la grande majorité des cas, lorsque l'ouvrage n'est pas fondé sur un substratum rocheux de prévoir une protection anti-affouillement au pied de l'ouvrage ; le mur peut être alors, soit fondé à la côte d'affouillement prévisible, soit protégé en pied par un matelas gabion souple et déformable reposant sur un géotextile et couvrant environ en largeur deux fois la profondeur de l'érosion prévisible

Pour des moyennes hauteurs de soutènement (cours d'eau et canaux petits gabarits):

La solution de gabions en géotextile est une alternative intéressante dans le cadre d'application approprié (faibles sollicitations et hauteurs de soutènement moyennes : h=1 à 2 m). La fonction du géotextile en conteneur est exposée plus loin, mais ce type de défense de berges nécessite aussi la mise en place d'un filtre géotextile en arrière des gabions, pour éviter l'entraînement du matériau de remblai (figure III-3).

Des solutions en nattes enveloppées des rondins métalliques peuvent être également envisagées pour effectuer des confortement de berges ; la possibilité de liaisonner entre eux les rondins par agrafage permet d'obtenir des protections de berges inclinées jusqu'à β=60° si toutefois la stabilité de la berge le permet.

Pour des faibles hauteurs de soutènement (h < 1 m):

Les solutions de type tunage sont possibles (figure III-4). La fixation du tunage dans le sol est assurée au moyen de pieux bois dont on dimensionne l'espacement, la fiche (***f***) et le diamètre (***d***) par un calcul de poussée-butée. L'écran de soutènement peut être réalisé au moyen de panneaux de bois ou de lés de géosynthétiques. Ces deux types d'écrans étant perméables, un filtre géotextile vertical doit être également interposé. Dans le cas d'un tunage géosynthétique, les fonctions de filtre et de soutènement peuvent être assurées par deux produits différents, ou un seul produit (ce dernier cas de figure sera exposé dans le chapitre suivant consacré à la fonction de conteneur).

Le tunage se montre efficace pour des sites assez peu exposés (canaux de navigation à petit gabarit, plan d'eau de loisirs). Ce système employé seul est sensible aux risques d'affouillement en pied.

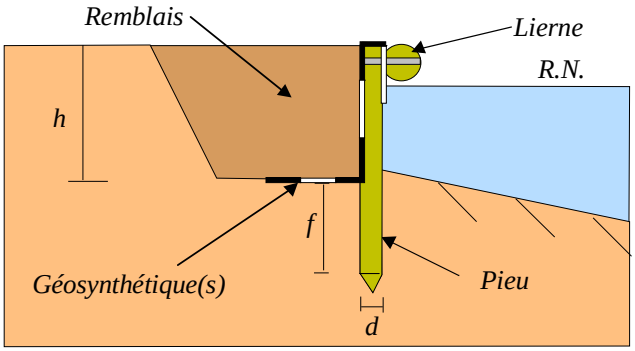


Fig. III-4 Protection de berge par tunage

III.2.1.2 spécifications concernant le géotextile

Les caractéristiques fonctionnelles hydrauliques du géotextile sont rigoureusement déterminées et spécifiées de la même façon que dans le cas d'une utilisation horizontale ou inclinée sous une couche de protection. Mis à part pour les gabions métalliques (risque de déchirure par l'armature de la cage), la mise en œuvre du remblai n'est a priori pas préjudiciable, et ne nécessite pas d'exigences fonctionnelles mécaniques spécifiques. Il faut toutefois veiller à ce que les hauteurs de chutes du matériau soient admissibles et que les manœuvres de la pelle hydraulique n'endommagent pas le produit.

III.2.1.3 conditions générales de mise en œuvre

stockage des produits :

Dans le cas d'une exposition aux U.V., il faut maintenir les rouleaux à l'abri ou dans un emballage de protection. Pour conserver les performances hydrauliques du futur filtre, on évitera tout colmatage à la boue ou à la poussière.

préparation du support :

La mise en œuvre peut s'effectuer en eau ou à sec. La berge doit présenter un état de surface plan et réglé de façon à permettre le meilleur contact possible du géotextile avec le sol support.

assemblage :

L'assemblage est réalisé par recouvrement qui doit être au minimum de 0,50 m.

couche intermédiaire :

L'emploi d'une couche intermédiaire peut être envisagé lorsqu'un drainage doit s'effectuer en arrière de la couche de protection (diminution des gradients hydrauliques dans le sol). Elle peut être constituée par un matériau granulaire ou un géosynthétique drainant.

Protection de pied contre les affouillements

Notamment pour les tunages, il faut bien veiller à ce que l'écran et le filtre géotextile se prolongent sous le sommet du talus sous-fluvial, pour que l'érosion de cette partie de la berge ne se poursuive pas sous la protection.

III.2.1.4 conditions d'entretien

Ces dispositifs de filtration ne nécessitent pas d'entretien lorsqu'ils ont été correctement conçus et exécutés

- ➔ en phase travaux : en l'absence d'endommagements lors de la mise en œuvre de la couche de protection, le géotextile remplira correctement la fonction de filtration dans l'ouvrage en service.
- ➔ en service : la couche de protection ne doit pas en principe se déplacer au cours de la vie de l'ouvrage, par conséquent, les risques d'endommagements en service sont minimes ; concernant l'exposition des géotextiles aux UV, les couches de protection en place empêchent une exposition prolongée. Toutefois, des couches de protection constituées de pavés bétons espacés pour favoriser la végétalisation de la berge présentent des phases temporaires à risques. Les tunages sont sensibles aux corps flottants : déchirure, perforation…

Néanmoins, il est recommandé de pratiquer dans le cadre d'une surveillance des ouvrages de protection de berge à une évaluation du comportement du filtre, qui ne peut certes pas être directe du fait de la présence de la couche de protection, mais l'analyse des désordres visibles peut permettre de diagnostiquer un dysfonctionnement du filtre.

Des précautions sont indispensables lors du fauchage de l'herbe. Par exemple, une lierne disposée en tête de pieux peut servir de guide à la faucheuse et évite de couper le géosynthétique (figure III-4).

III.2.2 Filtration du sol support sous une protection (FSP couche)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	+	+	0	0	0	0	++	+++	+

III.2.2.1 Principes de fonctionnement du dispositif global de protection

C'est l'emploi le plus courant des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion fluviale. La couche de protection de la berge contre l'érosion fluviale peut être assurée au moyen (figure III-5) :

- ➔ d'éléments libres (enrochements naturels ou artificiels),
- ➔ de **blocs liaisonnés** mécaniquement ou enrobés de bitume (pavés bétons).

Fig. III-5 Protection de la berge sous une couche de protection

Cette couche de protection aura pour fonction de confiner le sol support de la berge sensible à l'érosion et de dissiper l'énergie transmise par les sollicitations hydrauliques.
Le dimensionnement de cette couche de confinement est réalisé sur la base des paramètres caractéristiques

- ➔ des sollicitations hydrauliques (identifications et localisations des risques d'érosion),
- ➔ du sol support (granulométrie et caractéristiques géotechniques : cohésion, angle de frottement, nappe...),
- ➔ de la géométrie de la berge.

Des éléments sont proposés en annexe X.2.6.

III.2.2.2 Principes de fonctionnement du filtre géotextile

Dans ces systèmes de protection, il est généralement nécessaire d'interposer entre la couche de protection et le sol support un filtre qui :

- garantisse le maintien des échanges hydrauliques entre la nappe phréatique et le cours d'eau afin de ne pas provoquer de sous-pression (**critère de perméabilité**).
- évite l'entraînement des matériaux constitutifs de la berge par les sollicitations hydrauliques (**critère de rétention**).

Ce filtre ne joue pas un rôle direct de protection, il participe à la stabilité (micro-stabilité de l'interface sol-protection), à l'efficacité et à la pérennité de l'ensemble du dispositif. Cette fonction peut être remplie par une couche de matériaux à granulométrie variée (filtre granulaire) ou un géosynthétique.

III.2.2.3 caractéristiques et spécifications concernant le géotextile :

Un géotextile est placé sous la couche de protection à l'interface du sol à protéger. Le géotextile remplit principalement la fonction de **filtration** : il empêche le départ du sol de la berge entre les blocs, tout en permettant les échanges hydrauliques entre la nappe phréatique et le plan d'eau.

Lorsque le projeteur aura retenu la solution du filtre géotextile, il devra définir les caractéristiques du produit et les spécifier correctement dans le CCTP relatif à son chantier. Le choix d'un produit géotextile qui remplit une fonction principale de filtre sous une couche de protection s'opère en déterminant les caractéristiques suivantes:

- **exigences fonctionnelles hydrauliques**: application des critères de rétention et de perméabilité du filtre : l'ouverture de filtration du géotextile et sa permittivité sont déterminées en fonction de la granulométrie et de la perméabilité du sol à protéger (voir norme en bibliographie).
- **exigences mécaniques liées à la mise en œuvre**[6] : Il n'existe pas de méthode pour déterminer les caractéristiques mécaniques d'un géotextile en fonction du type et du mode de mise en œuvre de la couche de protection qui est appliquée à la berge. C'est l'expérience et l'intelligence du projeteur et une démarche d'examen de réalisations similaires à la sienne qui lui permettront de fixer les exigences requises (minimales ou maximales). Les contraintes principales auxquelles est soumis le géotextile, s 'exercent au cours de la pose du géotextile sur le sol support (éviter toutes aspérités) et lors de la pose de la couche de protection (principalement lorsqu'il s'agit d'enrochements libres). Les endommagements subits par les produits (déchirure, perforation, allongement, déformation) doivent être limités afin que le produit en service conserve les caractéristiques fonctionnelles hydrauliques exigées (toutefois, il est actuellement impossible d'évaluer les pertes d'efficacité dans la fonction hydraulique vis à vis des dégradations mécaniques). La résistance au poinçonnement, la résistance à la traction et la déformation à l'effort maximal doivent donc être spécifiées, pour limiter le risque d'endommagement, mais il est évident que plus la préparation du sol support et la mise en œuvre de la couche de protection sont soignées et moins les dégradations sont préjudiciables au bon comportement en service du géotextile. Il est donc recommandé de porter toute son attention sur le choix des matériaux et les techniques de pose de l'entreprise chargée des travaux (nature du sol support (limon et marne n'ont pas le même comportement) aspérités limitées des blocs, vérification des mailles des cages des gabions métalliques, hauteur de chute des blocs limitée, mise en place de protections...).
  Comme pour les exigences fonctionnelles hydrauliques, des normes européennes ont été publiées pour valider les caractéristiques mécaniques des produits (voir liste bibliographique).

[6] Le lecteur trouvera les informations liés aux sollicitations mécaniques dans le guide « ouvrages courants » du Comité Français des Géosynthétiques.

- **Exigences liées à la vie de l'ouvrage** : En théorie, mis à part la phase de stockage, la phase d'attente de couverture et l'utilisation sous pavés béton non végétalisés, les filtres géotextiles sous une couche de protection ne sont pas soumis au rayonnement ultra-violet. Toutefois, l'expérience du terrain pourra contraindre le projeteur à exiger une faible sensibilité aux U.V. Par ailleurs, si le risque de mise en traction du géotextile par glissement de la protection est démontré, un ancrage du géotextile est nécessaire ainsi qu'une vérification de sa résistance à la traction. En effet, un déplacement de 10 cm sur une longueur développée de 5,00 m représente un allongement de 2 % alors que si le produit n'est pas ancré, il glisse avec la couche de protection et donc ne subit aucune force de traction. Le choix de l'ancrage dépendra donc des dispositions constructives adoptées par le projeteur.

III.2.2.4 conditions générales de mise en œuvre

stockage des produits :

idem chapitre précédent

préparation du support :

idem chapitre précédent. Cette recommandation est plus exigeante dans le cas de la pose de pavés bétons.

sens de pose :

D'une manière générale, il est recommandé de dérouler les lés de géotextile dans le sens de la pente. Pour une berge de faible hauteur, il peut être envisagé d'employer un unique lé qui sera déroulé le long des lignes de niveau et réalisant les recouvrements dans le sens du courant.

assemblage :

Il existe deux modes d'assemblage : le recouvrement et le liaisonnement (par couture principalement). Pour une mise en œuvre sous eau, le recouvrement doit être au minimum de 0,50 m, ou 1 m dans les zones subissant des efforts particuliers. Les coutures peuvent être réalisées sur le chantier ou en usine.

ancrage :

Lors de la pose, la nappe est maintenue en place par des lests (sacs de sable ou quelques enrochements par exemple) ou des épingles en tête de berge. L'accrochage par des épingles à des niveaux intermédiaires dans la pente est déconseillé car les perforations du géotextile qui en résultent risquent de provoquer un lessivage local du sol à la mise en service. Quel que soit le système d'ancrage, il ne doit pas permettre la mise en tension du géotextile lors de la pose de la couche de protection, car cela augmente les risques d'endommagement du géotextile. L'ancrage définitif du géotextile en pied et en tête ne se fait qu'une fois la protection mise en œuvre.

couche intermédiaire :

Deux situations peuvent nécessiter l'emploi d'une couche intermédiaire

- ➔ lorsque les blocs de la protection ont un poids unitaire important ou sont lâchés d'une hauteur importante. Cette couche, interposée entre le géotextile et les enrochements peut être constituée d'un matériau granulaire (ou de petits blocs), ou d'un autre produit comme des nappes de roseaux.
- ➔ lorsqu'un drainage doit s'effectuer en arrière de la couche de protection. Elle peut être constituée par un matériau granulaire ou un géosynthétique drainant.

III.2.2.5 conditions générales de stabilité

La vérification de la stabilité de la couche de protection est réalisée comme décrit au § II. Elle consiste en une étude du glissement sur la pente et du frottement sur la couche support (cf. annexe X.2). Lors du dimensionnement deux cas se présentent :

- ➔ Soit la protection poids est libre (enrochement naturels ou artificiels)
- ➔ Soit de blocs liaisonnés (mécaniquement ou enrobés) dans ce cas on vérifiera le soulèvement et le glissement de la protection.

L'effort total de glissement (t_c) est fonction de l'épaisseur de sol (e) de la longueur (L) et de la pente (paramètre β) de la berge mais également du niveau de l'eau.

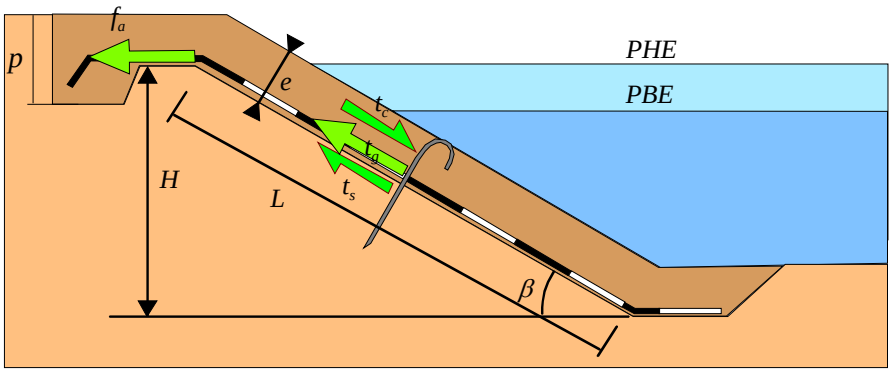


fig- III-6 schéma de résolution

Cet effort est transmis à l'ancrage par la mise en traction du géotextile (t_g) et repris en partie par le sol sous jacent (t_s). Un bon ancrage (f_a) dans le talus est recommandé car un mauvais raccordement au terrain naturel est une faiblesse propice aux affouillements (figure III-6).
Une protection de pied contre les affouillements peut être nécessaire pour éviter le creusement du pied de la berge (notamment pour la protection de rive externe d'un coude de rivière). Elle est constituée d'une butée en pied de protection en enrochements, avec un matelas gabion ou un géoconteneur. Pour les nappes comportant des pavés bétons, il n'est pas recommandé de faire reposé les panneaux sur une risberme sous fluviale, car dans ce cas de figure, le produit est très sensible aux vagues et aux abaissements de plans d'eau qui fragilise le pied de berge. Il est préférable de le prolonger à une distance suffisante sur le talus sous fluvial (à une cote où l'influence des niveaux est négligeable).

III.2.2.6 conditions d'entretien

Les mêmes recommandations qu'au chapitre précédent s'appliquent.

III.2.3 Conteneur d'une structure de protection (CGC)

La couche de protection contre l'érosion est assurée par des **éléments confinés** (matelas géotextiles, matelas métalliques, …).

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++		++	0	0	0	0	++	+	0

III.2.3.1 Principes de fonctionnement du dispositif global de protection

Afin de protéger une berge naturelle sensible à l'érosion fluviale, on peut lui appliquer un revêtement qui présente des caractéristiques satisfaisantes

- pour opposer une résistance aux sollicitations (poids, épaisseur...),
- pour confiner le sol constitutif de la berge,
- pour avoir une souplesse ou une très forte résistance vis à vis des déformations de surface du sol support (choix du matériau de remplissage),
- pour assurer un soutènement provisoire ou définitif,
- pour les interventions d'urgence (réparation ou travaux provisoire en cas de crue)

Les géosynthétiques peuvent être employés pour servir d'enveloppe aux matériaux de protection. Ils remplissent alors la fonction de conteneur :

- les gabions géosynthétiques,
- les tunages géosynthétiques,
- les matelas géosynthétiques,
- les géosynthétiques à poches,
- les multicellulaires en géotextile enveloppé de grille synthétique ou métallique (figure III-9).

III.2.3.2 Principes de fonctionnement du conteneur

La fonction conteneur, telle que présentée dans la première partie de ce guide (§ I.5) consiste à contenir le sol dans sa masse par effet membrane : la pression exercée par le sol est transformée en tension dans la nappe géotextile (figure III-7 et III-8). Dans une application en protection de berges, cette fonction « conteneur » est employée soit pour contenir la couche de protection (en matériaux

granulaires ou en béton) ou pour contenir le sol de la berge (tunage).

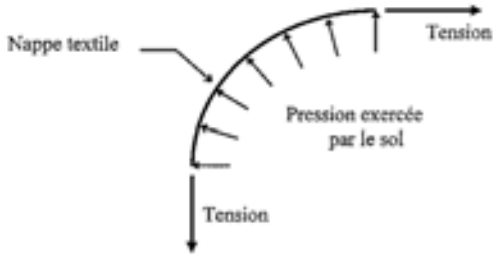


Fig. III-7 Fonctionnement en membrane d'une nappe conteneur

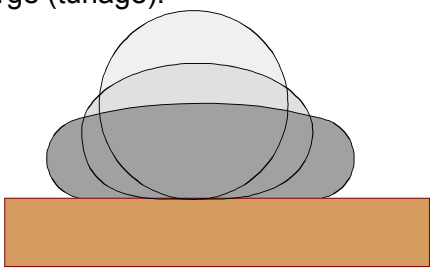


Fig. III-8 Évolution de la forme de plus en plus circulaire lorsque la pression à l'intérieur du conteneur augmente.

Pour une application en travaux d'urgence, la fonction conteneur en multicellulaires peut être employée soit avec les matériaux du site pour soutenir ou blinder provisoirement ou définitivement une berge gravement endommagée, soit avec des matériaux plus appropriés (matériaux argileux) pour rehausser et étancher une digue en cas de crue par exemple.
Dans ce paragraphe nous envisagerons uniquement la fonction conteneur d'une couche de protection. La fonction filtre qui lui est nécessairement associée doit être examinée. De plus, un système de conteneur en couche de protection de berges doit nécessairement reposer sur une couche filtrante.

III.2.3.3 spécifications concernant le géotextile :

Géosynthétique soutènement + filtre

Les exigences fonctionnelles hydrauliques du géosynthétique sont déterminées et spécifiées comme pour celles du filtre géotextile. Pour le sol, si la perméabilité du géotextile est insuffisante pour laisser l'eau s'échapper tout en retenant le sol (rôle de filtre), il faut prévoir des orifices plus perméables en différents points le long des conteneurs.
Les caractéristiques fonctionnelles mécaniques peuvent être évaluées en étudiant les contraintes effectives qui s'appliquent au géosynthétique par un calcul de poussée des terres classiques.

III.2.3.4 Conditions de mise en œuvre

Pour le dimensionnement du géotextile, les sollicitations mécaniques, supportées par la nappe pendant les différentes phases de la réalisation des conteneurs et en fonctionnement, devront être déterminées. En particulier, nous considérerons les cas suivants :

- ➔ Phase de remplissage des conteneurs,
- ➔ Manipulation pour le positionnement des conteneurs sur la berge,
- ➔ Empilement des conteneurs

La principale sollicitation est la tension dans la nappe. Le dimensionnement portera donc sur la résistance en traction du géotextile.

III.2.3.4.a Phase de remplissage des conteneurs :

Les sacs (forme 3D) et certains matelas (2D) sont généralement remplis de matériaux granulaires (sols ou cailloux). Mais le remplissage n'étant pas complet (pas de compactage), les sollicitations pendant cette phase sont faibles.

Fig. III-9 matelas tridimensionnels avant végétalisation sur berge

Fig. III-10 matelas tridimensionnels après végétalisation sur berge

Les tubes (1D) et matelas (2D) sont remplis par un fluide (béton ou sol à forte teneur en eau) introduit dans le conteneur à l'aide d'une pompe. Il est recommandé l'utilisation d'une pompe à fort débit et faible pression. Pour le béton, l'emploi d'un fluidifiant est préconisé de manière à avoir une meilleure plasticité et moins d'eau. Suivant la taille des panneaux et des tubes, le remplissage peut être effectué avec le conteneur textile complètement étalé sur la berge ou suspendu verticalement pour faciliter les opérations de remplissage (la partie basse est positionnée sur la berge et le conteneur est posé progressivement au fur et à mesure du remplissage).

Fig. III-11 mise en place et exemple de protection par géoconteneur

La tension dans la nappe augmente avec la quantité de matériaux introduite, donc en fonction de la hauteur du tube et de la pression du fluide dans le conteneur.
Il est indispensable de passer par une phase d'ancrage provisoire. En effet, le retrait dû au remplissage qui va suivre, induit une déformation différentielle sur la hauteur de la berge qui peut être dommageable pour l'efficacité du produit.

III.2.3.4.b Manipulation pour le positionnement des conteneurs sur la berge:

Lorsque les conteneurs sont manipulés une fois remplis pour être positionnes sur la berge, il est nécessaire de prendre en compte, non seulement la résistance des points d'accrochage pour le soulèvement ou le remorquage des nappes remplies mais aussi la tension de la nappe en partie courante.
Il peut être utile lors du remplissage de boudins de gros diamètre de prévoir un ancrage sur la génératrice supérieure pour éviter une rotation du conteneur (un point tous les 10 m).
Il faut tenir compte aussi de la pression (égale à la pression hydrostatique dans le cas d'un fluide) sur l'enveloppe textile due à la colonne de matériau à l'intérieur du conteneur, lorsque la nappe est soulevée verticalement.

III.2.3.4.c Assemblage des panneaux ou des boudins:

Assemblage par empilement des conteneurs

Il est possible d'empiler les conteneurs les uns sur les autres, et éventuellement de s'en servir pour supporter des charges. Une étude du comportement de conteneur soumis à des efforts de compression a montré que pour un géotextile donné, la résistance du conteneur à la compression, en terme de contrainte « apparente » (la contrainte apparente est le rapport de la force appliquée par unité de longueur divisée par le diamètre initial du conteneur), est peu influencée par le diamètre du conteneur, par contre le rôle du module d'élongation de la nappe textile est très important.

Assemblage par superposition des matelas

La liaison entre panneaux peut-être faite par couture ou agrafage ou simple superposition (fig III-12).

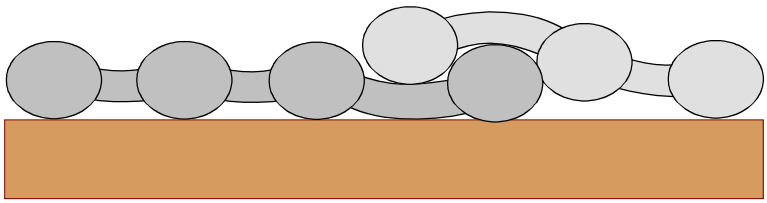


Fig. III-12 Exemple d'assemblage de panneaux

III.2.3.5 Conditions de stabilité

La stabilité de la couche de protection doit évidemment être assurée. Comme au § II, la stabilité du revêtement doit être assurée sur la pente par une étude du glissement et du frottement sur la couche support (cf. Annexe X.2). L'effort total de glissement (t_c) est fonction de l'épaisseur de béton (***e***) de la longueur (***L***), de la longueur du dispositif anti-affouillement si nécessaire et de la pente (paramètre β) de la berge mais également du niveau de l'eau. Cet effort est transmis à l'ancrage par la mise en traction du géotextile (t_g) et repris en partie par le sol sous jacent (t_s). Un bon ancrage (f_a) dans le talus est recommandé (figure III-13).

Au niveau des recouvrements, on accordera une attention particulière à l'usure possible des panneaux dans le cas de courants alternés.

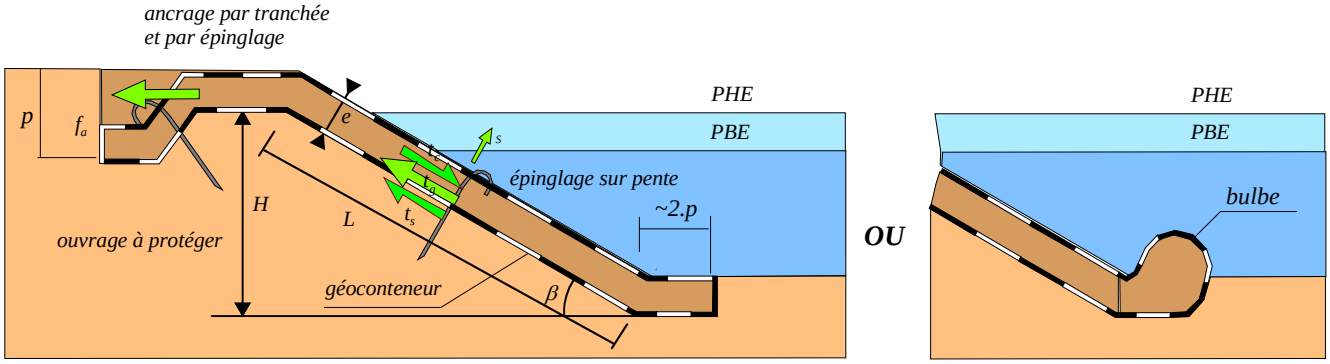


Fig. III-13 Méthode de calcul proposée

Un dimensionnement est nécessaire pour calculer l'épaisseur (***e***) de la couche de protection en béton coulé dans des géotextiles en fonction de la hauteur des vagues et de l'effort de soulèvement généré (***s***). Ce dimensionnement ne concerne pas le géotextile. Par contre le géotextile est concerné par les points ci-dessous.

- ➔ Résistance des coutures: il faut distinguer les coutures internes (qui donnent la forme au conteneur) et celles éventuelles de liaison entre panneaux (AIPCN 1987).
- ➔ Force de traction si remorquage (point 4b).

Le matelas est prolongé en partie basse par une longueur égale à deux fois la profondeur d'affouillement prévisible pour les matelas les plus rigides (figure III-13 à gauche) et par un bulbe qui vient combler l'affouillement pour les matelas les plus souples (figure III-13 à droite).

III.2.3.6 Conditions d'entretien

Vieillissement du polymère: Il est recommandé d'éviter le polyester, sensible au pH du ciment (AIPCN 92, p.27) pour les conteneurs de béton. Le polypropylène a une bonne résistance chimique pour des pH supérieurs à 2.

Vandalisme: Pour les conteneurs de matériaux granulaires, le problème du vandalisme, et donc de la protection des conteneurs, est un vrai problème. On peut recouvrir les conteneurs par du sable, mais uniquement la partie haute restera protégée à long terme. Des tests de résistance aux coups de couteau ou au feu ont été effectués sur des tubes.

Les conteneurs ont été protégés par du sable projeté manuellement ou mécaniquement sur une couche de résine époxy liquide répandue sur le géotextile. Sur certains, ce processus a été répété une autre fois (deux couches). Des mesures de l'effort de pénétration d'un couteau de chasse ont montré qu'une double couche de « résine + sable projeté » offrait la meilleure résistance et que, de plus, la coupure restait fermée, alors qu'elle s'était largement ouverte pour le géotextile non protégé laissant le sable s'échapper.

Vis-à-vis de la résistance au feu, le temps mis pour brûler le géotextile non protégé avec un chalumeau à gaz, a été de 5 s alors qu'il a fallu près de 2 minutes dans le cas du géotextile protégé par 2 couches.

III.2.4 Système de confinement géoalvéolaire (CGA)

Les systèmes de confinement géoalvéolaires composés d'un géosynthétique tridimensionnel souvent complété par des géogrilles placés en sous-face et/ou en surface créent des matelas qui peuvent être employés en protection de berge (figure III-14 et 15).

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	Meso	macro			
Pertinence	+++	+	++	+	0	0	0	+	+	0

Voir le III.2.3.5 pour la définition des paramètres de la figure III-14.

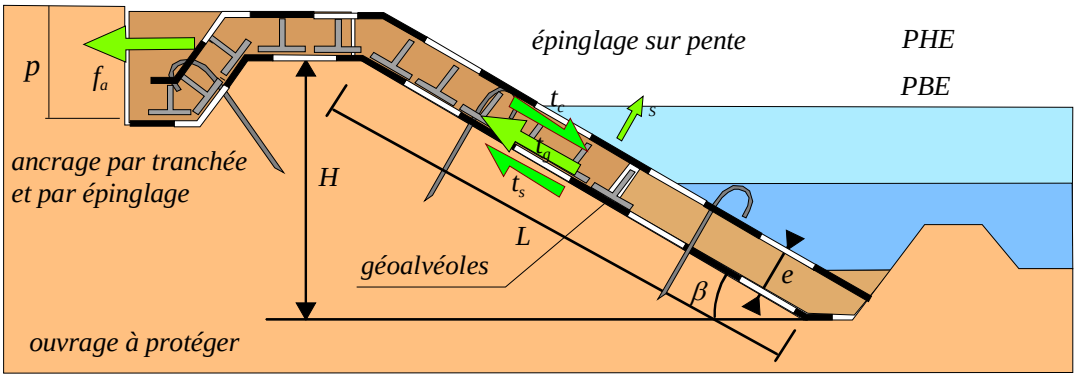


Fig. III-14 nappes tridimensionnelles pour végétalisation sur berge

III.2.4.1 Principes de fonctionnement du dispositif global de protection

Les géosynthétiques tridimensionnels peuvent être employés sur la partie émergée des berges même à forte pente (jusqu'à β=45°). Pour cela, ils sont renforcés à l'aide d'une géogrille ou d'un grillage métallique ce qui leur confère une beaucoup plus grande résistance à la traction ; de plus ces renforts sont utiles dans le cas d'utilisation de piquets d'ancrage sur la berge. Ils peuvent être également en fonction de leur résistance être utilisé comme une barrière anti-fouisseur.
Par ailleurs l'utilisation de géosynthétiques tridimensionnels renforcés permet d'envisager, de par leur résistance à la traction élevée, la végétalisation de berge incluant un système d'étanchéité en sous-face interdisant tout piquetage, par un ancrage en crête de berge

Fig. III-15 Protection de berge en système de confinement géoalvéolaire

III.2.4.2 Conditions de mise en œuvre

Les conditions de mise en œuvre et de stabilité de la nappe tridimensionnelle ainsi que les conditions d'entretien sont décrites dans le chapitre II.3.2.
Après remplissage, la liaison avec la structure de fermeture en sous-face ou en surface doit être réalisée par une liaison mécanique (plastique ou métallique) susceptible de supporter les efforts générés par le batillage.

III.2.4.3 Conditions de stabilité

La vérification de la stabilité est effectué comme au III.2.3.5, avec une attention plus importante sur la nature des efforts de soulèvement (**s**) qui s'exercent au niveau de la zone de marnage.
L'emploi de systèmes géoalvéolaires en site fluvial (partie immergée ou partie submersible) nécessite de fermer les alvéoles par une autre structure et de placer dans le complexe un sol à forte granulométrie. Cette fermeture doit être positionnée en face supérieure pour empêcher l'entraînement des matériaux et en face inférieure pour éviter la vidange lorsque le complexe bat sur la berge. Cette fermeture a l'avantage de lester le complexe et d'empêcher qu'il flotte (la densité des matériaux constitutifs des géosynthétiques est inférieure à celle de l'eau dans la plupart des cas).

III.2.4.4 Conditions relatives à l'entretien

Le fauchage est possible mais des précautions doivent être prises dans les premières saisons pour ne pas déchirer la nappe.

III.2.5 Natte de renforcement du sol d'apport (RSA)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
Pertinence	++	micro	meso	macro	micro	Meso	macro	++	+	0
		+	+++	+	0	0	0			

III.2.5.1 Principes de fonctionnement du dispositif global de protection

Là où les sollicitations hydrauliques le permettent, là où le souci d'intégration paysager et environnemental est recherché, une protection de la berge par végétalisation peut être envisagée. Afin de protéger une berge naturelle sensible à l'érosion fluviale, on peut lui appliquer un revêtement destiné à stabiliser la couche de surface constituée de matériau du site ou de matériau d'apport selon les conditions hydromécaniques et selon le(s) objectif(s) recherché(s). On cherche notamment à accroître dans certains cas, pour des régimes hydrauliques non torrentiels, le développement et la résistance de la végétation face aux contraintes qu'elle subit. Le dispositif mis en place doit :

- ➔ permettre de confiner et protéger le sol constitutif de la berge pour opposer une résistance aux sollicitations hydrauliques (poids, épaisseur, taux de couverture, cohésion, adhérence au support...),
- ➔ permettre d'accélérer et de faciliter le développement d'une couverture végétale qui augmente la résistance des couches superficielles de la berge face au courant fluvial et au batillage c'est à dire constituer un renforcement mécanique durable de la couche de surface de la berge et/ou de sa couverture végétale le cas échéant
- ➔ permettre de renforcer de façon durable le système racinaire de la végétation à l'arrachement
- ➔ avoir une grande souplesse ou une très forte résistance vis à vis des déformations de surface du sol support (choix du matériau de remplissage),
- ➔ être suffisamment poreux pour laisser traverser la végétation

Les protections de berges en surface peuvent être réalisées par :

- ➔ nappes alvéolaires : les géocellules,
- ➔ nappes tridimensionnelles : les nattes.

Il peut s'agir de renforcements pérennes ou biodégradables.

III.2.5.2 Principes de fonctionnement du renforcement

La fonction renforcement consiste à introduire dans les premiers centimètres de la couche de surface une armature capable d'assurer, par imbrication avec le système racinaire des végétaux par exemple, une cohésion d'ensemble de la couche (Gray et Leiser, 1989 et Hénensal, 1993).

Fig. III-16 Berge revêtue pour l'érosion fluviale

III.2.5.3 Conditions de mise en œuvre

Les conditions de mise en œuvre et de stabilité de la nappe tridimensionnelle ainsi que les conditions d'entretien sont décrites dans le chapitre II.3.3.

Fig. III-17 Mise en œuvre des protections de surface

Elles ne devront pas conduire à des sollicitations mécaniques incompatibles avec les propriétés des matériaux utilisés. Le fabricant sera tenu de préciser les modalités de mise en place, le Maître d'œuvre veillera quant à lui à ce qu'elles soient respectées sur chantier afin d'éviter tout endommagement irrémédiable du produit.

III.2.5.3.a Mise en place

Les lés sont déroulés perpendiculairement à la berge, de l'aval du fleuve vers l'amont pour bénéficier d'un effet tuile favorable au niveau des recouvrements latéraux (figure III-17). Un fichage ou micro clouage périodique est généralement réalisé, notamment au droit des recouvrements. La densité des fiches et leur longueur est fonction des conditions de site et des contraintes subies par le produit.

III.2.5.3.b Phase de remplissage

Les nappes sont généralement remplies sur site de terre ou de matériaux granulaires selon les cas. Certains produits à base de bitume sont remplis en usine et livrés prêts à être déroulés.

III.2.5.3.c Ensemencement

Selon les procédés, il a lieu avant ou après la pose des géosynthétiques. Il convient de veiller à la bonne fertilité du support, et de programmer les travaux dans des périodes de l'année propices à la germination.

III.2.5.4 Conditions de stabilité

La stabilité du dispositif doit évidemment être assurée. Il est impératif de vérifier la stabilité

- ➔ pour une rupture circulaire dans le cas d'un massif ou les nappes servent également de renforts (figure III-16). Quand il est prévu d'utiliser des techniques végétales où le système racinaire des plantes fait partie intégrante de l'ouvrage, on justifiera cette résistance à la traction sur la ligne de rupture, la cohésion apparente ainsi que la durabilité au regard de la durée de vie projetée de l'ouvrage.
- ➔ au glissement de ces protections sur le profil de la berge (voir annexe X.2). Comme au § II, la stabilité du revêtement doit être assurée sur la pente par une étude du glissement et du frottement sur la couche support sauf si le fichage du produit est possible.

Les conclusions de cette analyse de la stabilité indiqueront au projeteur si le choix d'une nappe tridimensionnelle renforcée ou non est nécessaire, ainsi que des dispositions particulières de pose

(ancrage par piquetage ou à l'aide d'une bêche). Il conviendra de s'assurer à partir de résultats d'essais sur site ou en laboratoire de la compatibilité du dispositif retenu avec les sollicitations hydrauliques à considérer pour le site.

III.2.5.5 Conditions relatives à l'entretien

III.2.5.5.a Fauchage

Le fauchage est possible mais des précautions doivent être prises dans les premières saisons pour ne pas déchirer la nappe.

III.2.5.5.b Durabilité

Les produits géosynthétiques, s'ils risquent de ne pas restés enfouis en permanence, devront disposer d'un traitement pour résister aux U.V.

Les nattes de jute et de coco (dont la masse surfacique peut atteindre 700 à 1000 g/m²) peuvent être employées en fonction provisoire de filtration dans divers dispositifs (fascines de saules et de plantes halophytes -roseaux-, caissons végétalisés à double paroi). Au bout d'un an ou deux de service, les bionattes ont quasiment disparu, la berge est stabilisée par les dispositifs végétaux.

III.3 SEUILS EN RIVIÈRES

III.3.1 Solutions possibles

Des seuils sont construits en rivière souvent dans des thalwegs ou dans des ravines, pour maintenir un niveau de ligne d'eau, protéger un ouvrage situé à son aval immédiat ou rétablir la pente d'équilibre du cours d'eau (figure III-18). L'aménagement de ces ouvrages permet par décantation et accumulation à l'amont du seuil des matériaux charriés, de réduire la pente du lit du cours d'eau et ainsi l'écoulement des eaux devient compatible avec la stabilité des matériaux constituant le lit. Le seuil et son radier aval peuvent être construit en béton, en maçonnerie, en enrochements libres ou liés ou en gabions.

Fig. III-18 Seuils anti-érosifs en gabions métalliques et en géofilet

Dans les zones difficiles d'accès en particulier en montagne, ou dans les ravines ou cours d'eau fortement érodables, l'utilisation d'aménagements « souples » et facile à mettre en œuvre est souvent recommandée. Les réalisations en gabions flexibles et peuvent subir des contraintes et déformations sans rien perdre en efficacité, permettent ainsi d'atteindre le plus souvent ces objectifs.

Pour des utilisations à plus court terme dans le cadre des chantiers, les seuils peuvent être des outils de maîtrise de la sédimentation et du stockage des eaux lorsque la construction d'un bassin de sédimentation ne se révèle pas économiquement viable.

Il y a deux fonctions que peuvent remplir les géotextiles au sein de ces ouvrages :

- ➔ lorsque l'on utilise des enrochements pour constituer le seuil ou uniquement son aval radier, il est impératif d'éviter que le sol support ne soit entraîné par les courants. Il faut donc placer la protection sur un filtre qui peut être granulaire ou géotextile.
- ➔ lorsque l'on utilise des gabions pour constituer le seuil, on peut installer un filtre en géotextile à l'arrière du seuil pour éviter la migration des fines ; il est nécessaire alors après la construction de l'ouvrage de protéger le géotextile en remblayant localement à l'arrière du seuil. Si le géotextile n'est pas utilisé, un filtre naturel se mettra en place à l'arrière du seuil par accumulation des matériaux et par percolation du mur en gabions, mais sur une plus longue durée.

➔ lorsqu'une érosion importante de l'aval radier vient à créer des cavités sous l'ouvrage, il est extrêmement difficile de venir les combler sans détruire l'ouvrage. Une solution envisageable est l'injection de béton dans des conteneurs géosynthétiques.

III.3.2 Système de gonfinement géoalvéolaire par seuil (CGAs)

Ce type de seuil est surtout destiné aux fossés, aux ravines et aux petits canaux. Il peut être utilisé de façon temporaire lors de travaux pour limiter la pollution des eaux en aval ou de façon permanente dans le cadre d'aménagement de bassins versants.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	Meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	0	0	0	++	0

Dans le cas de réparation de fossés érodés qui ont acquis la géométrie de ravine par creusement excessif , il est nécessaire de réaliser un comblement préalable. Celui-ci sera effectué par matériau d'apport ou par comblement naturel en plaçant des système de confinement par géoconteneur (des chaussettes géotextile remplies de granulats) par intermittence (voir III.3.4). Une fois le comblement réalisé, on pourra mettre en place des seuils.

III.3.2.1 conditions de stabilité

Il faut considérer le dimensionnement du seuil par rapport à la dissipation de l'énergie de l'écoulement et des matériaux à retenir en tenant compte des conditions du site (hauteur d'eau, vitesse du courant). Les caractéristiques de filtration du géosynthétique seront choisis de manière à retenir la plupart des particules en suspension. Il s'agit généralement d'une natte à petites mailles.

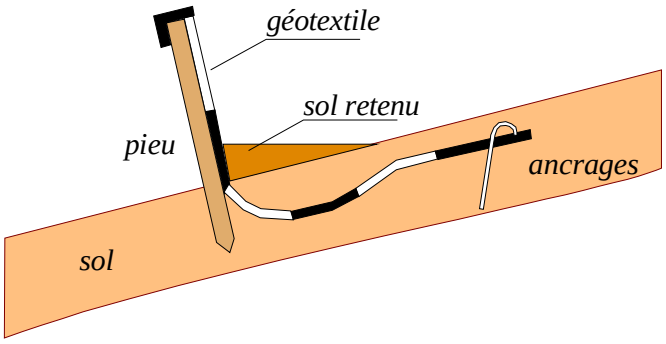


Fig. III-19 Seuils anti-érosifs en géofilet

III.3.2.2 conditions de mise en œuvre

Une géonatte ou une bionatte est disposée sur une structure qui est fixée dans le fossé. Une tranchée est réalisée au préalable en travers du fossé (figure III-19). Après placement du géosynthétique, celui-ci est recouvert pour être maintenu et éviter le passage de l'écoulement au dessous du seuil. De même, la structure doit remonter suffisamment latéralement pour ne pas être contournée. La mise en œuvre s'effectue à sec ou en eau.

III.3.2.3 conditions d'entretien

Le géotextile étant exposé directement aux rayons du soleil, une tenue aux UV est à exiger. Ces dispositifs ne nécessitent pas d'entretien lorsqu'ils ont été correctement conçus et exécutés. Ils doivent être curés avec une périodicité assez courte, généralement quand ils sont à moitié pleins.

III.3.2.4 fonctions spécifiques

Les géotextiles n'ont pas d'autre fonction que le confinement et la filtration dans ces applications.

III.3.3 Filtration sous une couche de protection (FSP)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	Meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	0	0	0	++	0

III.3.3.1 conditions de stabilité

Il y deux dimensionnements à considérer :

➔ le dimensionnement de la protection (voir annexe) : le poids et les dimensions des blocs d'enrochements à mettre en œuvre pour dissiper l'énergie de l'écoulement sont vérifiés en principe sur modèle réduit en tenant compte des conditions du site (hauteur d'eau, vitesse du courant).

➔ le dimensionnement du filtre en géotextile : il est identique à celui présenté pour les protections de berge en enrochements sur filtre géotextile, tout en considérant que le poids unitaire des blocs de seuils est plus important que pour une protection de berge. La condition de résistance au poinçonnement, à la traction et à l'allongement maximal doit être

vérifié pour éviter tout endommagement à la mise en œuvre. Une couche intermédiaire peut s'avérer nécessaire.

III.3.3.2 conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre s'effectue à sec ou en eau (à l'étiage : pas de surverse du seuil pendant les travaux).

assemblage :

Dans le cas d'un recouvrement (l'effectuer dans le sens du courant) des géotextiles, celui-ci doit être au minimum de 2 m. On a également recours à des assemblages par couture de panneaux comportant plusieurs lés. Ceux-ci sont réalisés sur le chantier ou en usine

couche intermédiaire :

Une couche intermédiaire peut s'avérer nécessaire lorsque les blocs de la protection ont un poids unitaire important. Cette couche, interposée entre le géotextile et les enrochements, est en principe constituée de blocs de plus petite dimension.

III.3.3.3 conditions d'entretien

Ces dispositifs ne nécessitent pas d'entretien lorsqu'ils ont été correctement conçus et exécutés.

III.3.3.4 fonctions spécifiques

Les géotextiles n'ont pas d'autre fonction que la filtration dans ces applications.

III.3.4 Système de confinement par géoconteneurs (CGC)

Dans un emploi de comblement de cavités sous ouvrage, souvent en aval du seuil, le géosynthétique a un rôle de conteneur du béton que l'on injecte pour remplir le vide. Il sert de coffrage au béton qui peut venir épouser les formes de la cavité sans se répandre entre les blocs. L'emploi d'une telle technique nécessite une surveillance du site après mise en œuvre afin de constater qu'aucun affouillement ne se forme sous ces réparations.

Cette solution peut être également envisagée pour combler une ravine et par effet de seuil provoquer la sédimentation des matières en suspension. On utilise alors un géoconteneur de type tube appelé chaussette, rempli de granulats.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	Meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	0	0	0	0	0

III.3.4.1 conditions de stabilité

Les géosynthétiques employés comme conteneur doivent donc présenter des caractéristiques de résistance mécanique qui sont sollicitées pendant le remplissage. Ce type de réparation impose que l'on vérifie la stabilité de l'ouvrage dans sa nouvelle configuration.

III.3.4.2 conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre s'effectue à sec ou en eau (à l'étiage : pas de surverse du seuil pendant les travaux).

III.3.4.3 conditions d'entretien

Ces dispositifs ne nécessitent pas d'entretien lorsqu'ils ont été correctement conçus et exécutés.

III.3.4.4 fonctions spécifiques

Les géotextiles n'ont pas d'autre fonction que de contenir le matériau de comblement.

III.4 PILES DE PONTS

III.4.1 Solutions possibles

Les piles de ponts situées dans un écoulement hydraulique subissent des sollicitations très fortes, dues au rétrécissement de la section qu'elles occasionnent et à l'accélération du courant qu'elles provoquent (METL, 1980).

Fig. III-20 Protection de piles de pont avec des gabions matelas

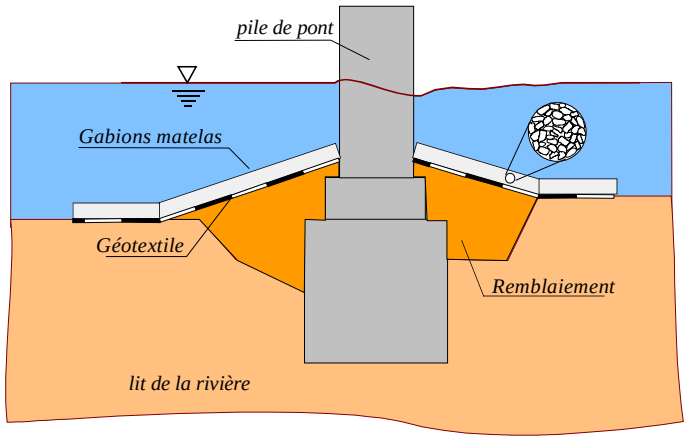


Fig. III-21 Filtration sous une protection en gabions

Sur des ponts existants, il faut donc surveiller l'apparition éventuelle de fosses d'érosion. Une fois découverte et suivie, cette fosse doit être comblée pour éviter une ruine de l'ouvrage, puis protégée s'il y a lieu (figure III-02 et 21). Les matériaux de comblements sont les matériaux du lit du cours d'eau qui seront ensuite protégés, des enrochements, des gabions matelas ou des sacs remplis de bétons.
Sur des ouvrages neufs, il faut prévenir ce genre de problèmes en dimensionnant correctement les protections initiales : enrochements, gabions...
Les solutions employant des géosynthétiques pour la protection des piles de pont en rivière sont limitées :

- ➔ aux fonctions de filtration sous la protection,
- ➔ aux fonctions de conteneurs : gabions, sacs.

III.4.2 Filtration sous une protection (FSP)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	Meso	macro			
Pertinence	0	0	0	0	0	++	+	++	+++	0

III.4.2.1 conditions de stabilité

Un matériau de remplissage vient combler la fosse d'érosion, et il faut éviter que les matériaux rapportés ne soient entraînés par le courant. Il convient alors de protéger la zone aménagée à l'aide d'une protection installée sur un filtre. Un filtre géotextile peut remplacer le filtre granulaire dans ces fonctions.
Il y a donc deux dimensionnements à considérer :

- ➔ la conception de la protection en enrochements, ou en gabions est opérée en tenant compte des conditions du site (vitesse du courant, remous au niveau des piles, bathymétrie).
- ➔ le choix du filtre géotextile s'opère suivant les modalités présentées dans le paragraphe traitant des protections de berges en enrochements sur filtre géotextile tout en considérant que le poids unitaire des blocs ou gabions est plus important que pour une protection de berge (voir § II.2.2 et § II.2.3). La condition de résistance au poinçonnement, à la traction et à l'allongement maximal doit être vérifiée pour éviter tout endommagement à la mise en œuvre. Une couche intermédiaire peut s'avérer nécessaire.

Si la protection est constituée de gabions, le filtre géotextile peut être posé à l'interface entre le fond du lit à protéger et les gabions ou dans les gabions, avant leur remplissage.

III.4.2.2 conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre peut s'effectuer en eau où elle nécessite des moyens fluviaux ou hors d'eau à l'abri d'un batardeau.

assemblage :

Dans le cas d'un recouvrement - dans le sens du courant, il doit être au minimum de 2 m. On a également recours à des assemblages de panneaux comportant plusieurs lés par couture sur le chantier ou en usine.

couche intermédiaire :

Une couche intermédiaire peut s'avérer nécessaire lorsque les blocs de la protection ont un poids unitaire important. Cette couche, interposée entre le géotextile et la protection, est en principe constituée d'un matériau granulaire (ou de petits blocs).

III.4.2.3 conditions d'entretien

Ces dispositifs ne nécessitent pas d'entretien lorsqu'ils ont été correctement conçus et exécutés.

III.4.3 Système de confinement par géoconteneur (CGC)

Les conteneurs ont pour fonction de combler la fosse d'érosion créée par les turbulences autour des piles de ponts. Il peut s'agir de géotubes ou de géomatelas (figure III-22 et 23).

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	Meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	++	0	++	0	0

Fig. III-22 Protection de piles de pont avec des conteneurs.

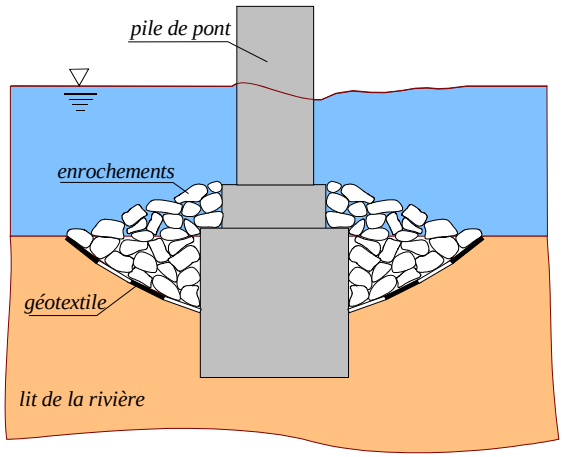


Fig. III-23 Filtration sous une protection

III.4.3.1 Conditions de mise en œuvre

Identique au II.2.3.4

III.4.3.2 Conditions de stabilité

Identique au II.2.3.5

III.4.3.3 Conditions relatives à l'entretien

Identique au II.2.3.6

IV ÉROSIONS LITTORALE ET MARITIME

IV.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOTEXTILES

L'érosion littorale et maritime intéresse différents types d'ouvrages :

- ➔ les dunes,
- ➔ les hauts de plages,
- ➔ l'estran,
- ➔ les fonds marins,

mais les estuaires relèvent de la même problématique.

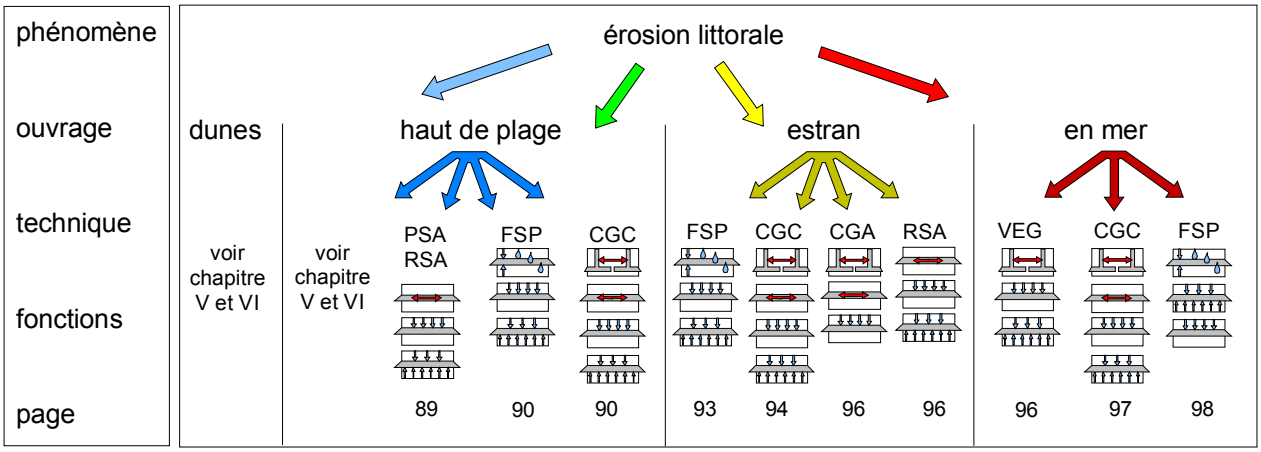


Fig. IV-1 Organigramme de choix.

IV.1.1 Le constat

L'intensité du recul du littoral par érosion marine varie selon les façades maritimes et la nature géologique et géotechnique des sols ou roches en présence (figure IV-2). C'est ainsi que sur 5.533 km de littoral français métropolitain, l'érosion est de plus d'un mètre par an sur 850 km et de 0,5 m par an sur 1.000 km, et atteint parfois plusieurs dizaines de mètres lors d'une seule tempête.

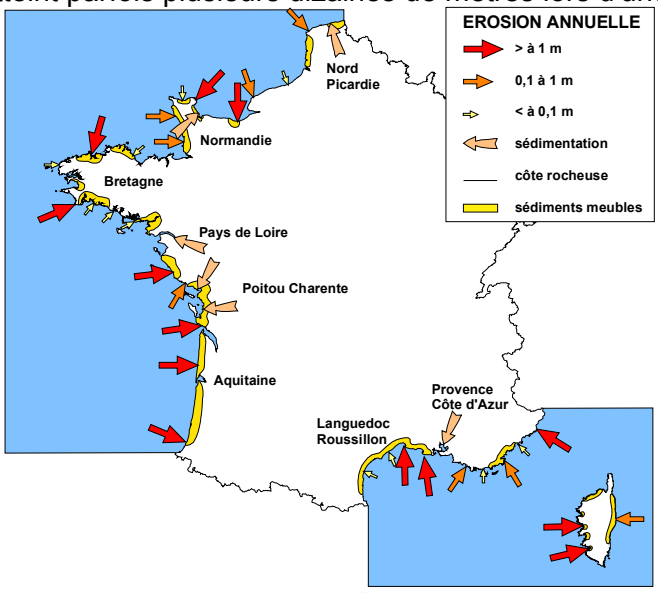


Fig. IV-2 Carte de l'érosion littorale.

D'après les résultats d'un programme européen récent, en France, 45% du linéaire côtier est stable, **24% en recul** et 11% en engraissement. Cette situation n'est pas exceptionnelle puisqu'en Europe,

55% des littoraux sont stables, 20% sont en recul et 8% en engraissement. Mais les fluctuations du trait de côte sont parfois spectaculaires : des records absolus ont été enregistrés sur la côte d'Arvers, entre l'île d'Oléron et la Gironde, avec des reculs pouvant atteindre 35 mètres par an.

	Dominantes géomorphologiques*	Érosion confirmée	Principalement observée sur
Manche mer du Nord	Cotes rocheuses : 37% Plages : 37%	30%	50% des plages 28% des côtes rocheuses
Atlantique	Plages : 44% Rivages limono-vaseux : 18%	24%	48% des plages
Méditerranée	Côtes rocheuses : 51% Rivages artificialisés : 17% Plages : 32%	11% Languedoc-Roussillon : 22% PACA : 14%, Corse : 6%	36% des plages

*En pourcentage du linéaire côtier Source Corine Érosion côtière (AEE)/Ifen

En pourcentage du linéaire côtier, les régions proportionnellement les plus touchées par l'érosion sont le Nord Pas de Calais (75% de ses côtes en recul), la Haute-Normandie (55%) et la Picardie (42%). Les autres régions connaissent des taux d'érosion de 14 à 39% environ, à l'exception notable de la Corse, qui n'enregistre une érosion que sur 6% de son trait de côte.

IV.1.2 La plage

Avec 5 533 km de côtes, la France métropolitaine possède un littoral d'une grande variété, dominé par les plages. S'y ajoutent 1 459 km pour les DOM-TOM. L'ensemble de ce linéaire côtier français présente, de façon plus ou moins sensible, des signes d'érosion se traduisant par une tendance prépondérante au recul du trait de côte.

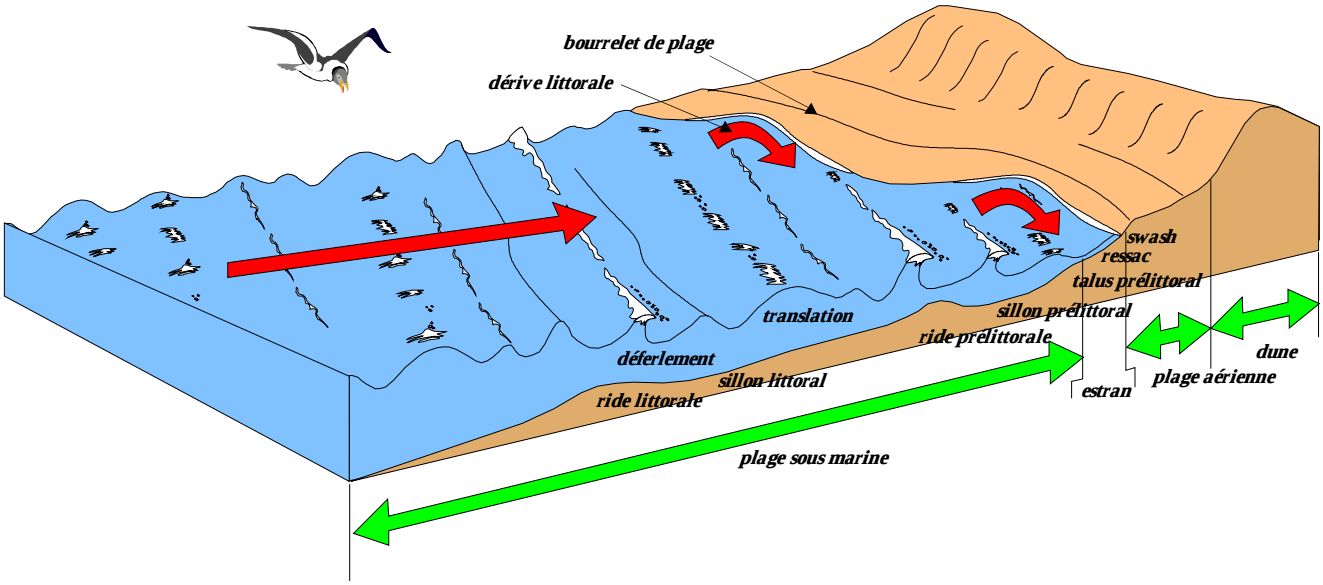


Fig. IV-3 Description d'une plage.

Le profil d'une plage se partage en trois unités géomorphologiques : la plage émergée, l'estran et la plage immergée (figure IV-3).

- ➔ L'estran est la zone alternativement couverte et découverte par la mer. La très faible marée réduit l'estran ausecteur balayé par le jet de rive (swash) et le courant de retour (ressac et backwash). Il est bordé en amont par le bourrelet de plage et en aval par le talus prélitorral sur lequel se produit le déferlement.
- ➔ La plage aérienne (ou plage émergée ou terrestre) s'étend du pied de dune à la limite supérieur de l'estran. La dépression entre le pied de dune et le bourrelet de plage constitue l'arrière plage.
- ➔ Enfin, la plage sous-marine (ou immergée) est toujours recouverte par les eaux marines elle subit donc continuellement l'action des vagues contre le fond. Dans la zone où viennent déferler les vagues, se trouve généralement le talus prélittoral. Plus en aval, à partir de 50 à 70 cm de profondeur, on rencontre une succession de crêtes et sillons prélittoraux. Puis, plus au large encore, se développent une ou plusieurs barres littorales.

IV.1.3 Les causes

Ce phénomène connaîtrait, selon les experts, une aggravation et une généralisation en ce début de XXI^{ième} siècle ; sans doute de par l'épuisement des stocks sédimentaires mobilisables, la recrudescence de fortes tempêtes et la remontée du niveau marin. A ces effets, s'ajoutent la pression des activités urbaines en zone littorale et l'émergence des impacts des ouvrages de protection portuaire construits il y a quelques décennies.

Facteurs naturels :

- ➔ les vents,
- ➔ hydrodynamiques (variations du niveau marin, les courants, les houles…)(figure IV-4).

Fig. IV-4 Topsail Island, North Carolina avant et après l'ouragan Fran en 1996

Facteurs humains :

- ➔ extraction,
- ➔ urbanisation,
- ➔ aménagement du littoral (création des ports de plaisance, endigage des débouchés de fleuves côtiers,...),
- ➔ ouverture incontrôlée du littoral au public.

IV.1.4 Les solutions ou actions

IV.1.4.1 Le traitement institutionnel : un cadre d'intervention complexe, la sensibilisation du public et des élus

Depuis de nombreuses années la décentralisation a favorisé l'émergence de structures assurant le transfert d'information des institutions (administrations d'état) productrices de connaissance (données scientifiques) vers les usagers institutionnels et professionnels. On peut citer l'Observatoire de l'environnent littoral et marin pour la Manche et le sud de la Mer du Nord, mission du conseil Régional Nord Pas de Calais confiée à l'Espace Naturel Régional qui est à l'origine de colloques internationaux sur l'érosion côtière en 1994 et 2001.

On peut citer aussi le Conservatoire du littoral, créé par la loi du 10 juillet 1975, qui veille à la protection foncière du littoral, au respect des sites naturels et de l'équilibre écologique. Sur les plus de 650 km de linéaire côtier (maritime et lacustre) et les 46 000 hectares acquis par le Conservatoire du littoral, les deux tiers sont touchés par l'érosion ou susceptibles de l'être. Rien, dans la législation en vigueur, ne l'oblige à intervenir. Il autorise cependant des consolidations, supprime ou entretient les digues, selon les cas, et fixe le cordon dunaire.
On notera que c'est sur le littoral méditerranéen qu'a eu lieu la plus grande partie des acquisitions (57 %). Près de 160 000 ha supplémentaires pourraient être achetés d'ici à 2050.

Les travaux de protection contre l'érosion relèvent de l'initiative des propriétaires riverains et la responsabilité de ces travaux incombe aux collectivités locales depuis 1973. Mais les prix au mètre linéaire peuvent varier de 91 euros, pour une protection constituée de pieux en bois, à 1500 euros, pour une digue-promenade... L'IFREMER estime la dépense annuelle pour la protection du littoral contre l'érosion marine à environ 18 millions d'euros, la moitié du budget étant à consacrer au littoral

atlantique.

Le législateur et les autorités délibérantes des collectivités locales ont à leur disposition une palette d'instruments leur permettant d'intégrer le phénomène d'érosion du littoral dans l'aménagement du territoire

- documents d'urbanisme et...
- loi « littoral » : loi n°86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral,
- les plans de prévention des risques naturels (PPR) : loi n°95-101 du 2 février 1995.

En s'appuyant sur le droit commun de l'urbanisme ou les PPR, les collectivités locales et l'État ont désormais les instruments réglementaires pour assurer une prévention des risques engendrés par l'érosion.

IV.1.4.2 Le traitement technique : les interventions et ouvrages en mer ou sur le rivage

IV.1.4.2.a Les aménagements dynamiques

Face à un problème d'érosion du littoral, et en complément ou parallèlement aux mesures institutionnelles, il convient dans un premier temps de chercher à agir sur les matériaux composant ce littoral ou à le faire participer à sa propre défense.
Ces actions sur les matériaux naturels du littoral combinent généralement une intervention initiale relativement lourde et des mesures de suivi et d'entretien régulières.
Les aménagements dynamiques qui en découlent peuvent alors prendre les formes suivantes :

- rétablissement d'un transit littoral bloqué par un ouvrage par dispositifs ou interventions de transit artificiel (by-passing),
- réhabilitation et mise en défens du cordon dunaire et de l'arrière plage,
- rechargement de plage par apport de matériaux extérieur au secteur en érosion,
- protection ou reconstitution d'herbiers,...

Certaines de ces techniques correspondent à la fois au traitement de désordres liés à l'érosion littorale et à l'érosion éolienne et intègrent donc des phénomènes maritimes et éoliens.

IV.1.4.2.b Les ouvrages statiques

Lorsque les mesures institutionnelles et dynamiques s'avèrent insuffisantes ou inadaptées et que le recul naturel du trait de côte ne peut être admis, la construction d'ouvrages en mer ou sur le rivage s'impose.
Les ouvrages statiques peuvent être classés en trois grandes familles (figure IV-5):

- les protections de haut de plage (perrés, digues ou murs),
- les brise-lames,
- les épis (perpendiculaires ou en T par rapport au rivage).

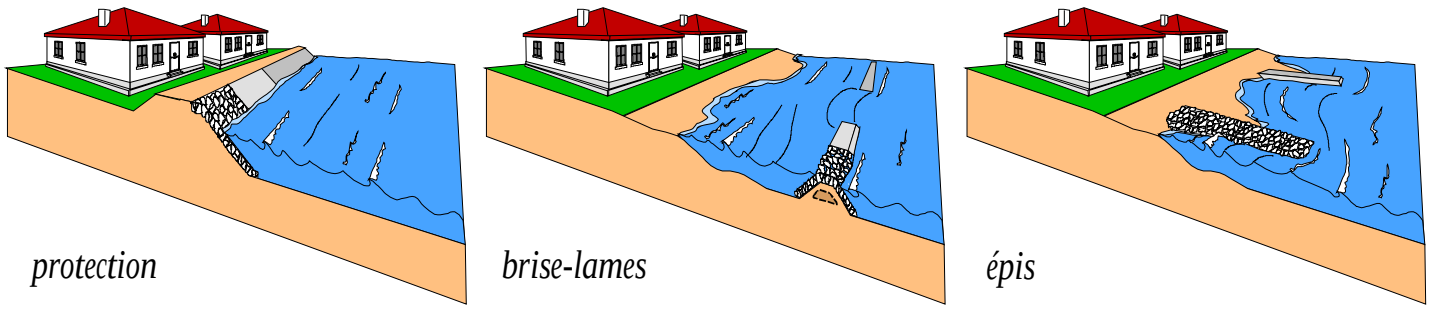


Fig. IV-5 Schémas des différentes solutions

IV.1.4.3 Les particularités de l'emploi des géosynthétiques en milieu marin

IV.1.4.3.a Nature des principales applications

Les géotextiles ou produits géosynthétiques sont utilisés dans la construction ou la réalisation d'ouvrages neufs ou dans des opérations d'entretien ou de confortement d'ouvrages existants qui participent à la lutte contre l'érosion littorale et maritime.
Ils interviennent alors en tant que constituants principaux de ces ouvrages, essentiellement en fonction conteneur, ou comme des éléments techniques assurant un rôle capital dans leur

comportement, essentiellement en fonctions séparation et filtration ou en se substituant aux traditionnels filtres et dispositifs anti-affouillement en matériaux granulaires ou en petits enrochements.
Comme nous l'avons exposé précédemment, la conception d'un dispositif de protection du littoral nécessite une démarche préalable de diagnostic et de concertation permettant d'obtenir une parfaite connaissance des mécanismes en jeu et d'appréhender le problème d'érosion et ses enjeux dans leur ensemble.
Ceci passe notamment par le recensement des phénomènes hydrauliques (variations du niveau marin, courants, houles), leur détermination (amplitude et vitesse de variation du niveau marin ; vitesse et sens des courants ; hauteur, période et longueur d'onde des vagues), leur localisation sur le rivage (petits fonds, estran, plage ou falaise, dunes et landes côtières,...).
Le linéaire de littoral examiné doit être suffisamment étendu pour pouvoir être considéré comme une unité sédimentologique et constituer a priori le territoire cohérent d'application d'un schéma souhaitable de protection et de gestion du littoral.
Cette approche à dominantes techniques et socio-économiques ne doit cependant pas faire oublier que les mesures à étudier devront être autorisées avant de pouvoir être mises en œuvre et que les autorisations relèveront de domaines aussi divers que la police de l'eau, la protection de l'environnement ou l'occupation du domaine public maritime.
A l'issue de ces échanges et analyses, les techniques ou mesures de protection envisageables pourront être précisées en prenant en compte les fonctions réelles que le dispositif devra ou pourra assurer.
C'est ainsi que, dans l'utilisation des techniques géosynthétiques à sa disposition, le technicien, maître d'œuvre ou entrepreneur, chargé de la définition ou de la réalisation d'un système de protection du littoral aura à avoir une double approche :

- ➔ conception globale d'un ouvrage répondant à une commande ou à un cahier des charges précis
- ➔ détermination des constituants fonctionnels, dont les géosynthétiques, assurant un rôle essentiel dans le comportement des ouvrages.

Les paragraphes qui suivent vont donc présenter les principales techniques d'intervention en lutte contre l'érosion littorale dans lesquelles l'emploi de géosynthétiques est possible et a déjà été mis en application avec succès.
Seront donc exposés :

- ➔ les principes de fonctionnement de chaque type d'application
- ➔ les recommandations propres à leur dimensionnement, leur mise en œuvre et leur entretien
- ➔ les différentes familles de produits au travers de photos ou schémas d'applications effectives.

IV.1.4.4 Avantages des produits géosynthétiques

Dans la construction ou la réparation d'ouvrages littoraux ou portuaires, l'utilisation de produits géosynthétiques présente un certain nombre d'avantages qui concourent à la fiabilité et à la qualité des constructions :

- ➔ la fabrication de produits industriels (standards et spécifiques) permet de disposer sur le site de matériaux dont les caractéristiques sont connues et constantes ; limitant ou réorientant les contrôles des constructeurs,
- ➔ le remplacement d'une ou plusieurs couches de matériaux granulaires ou de petits enrochements par un produit qui se présente généralement en nappes de grandes dimensions permet de limiter les extractions et les transports à pied d'œuvre,
- ➔ l'utilisation des moyens nautiques est rationalisée avec globalement une simplification des techniques de construction et un gain de temps,
- ➔ les interventions subaquatiques sont spécialisées, réduites et sécurisées.

A ces avantages liés à l'utilisation fonctionnelle des géosynthétiques s'ajoutent ceux liés à leur usage en tant que conteneur composant structurel :

lorsque la granulométrie des matériaux disponibles est insuffisante pour que ces matériaux soient stables vis à vis des sollicitations hydrodynamiques, leur confinement par un géosynthétique permet d'obtenir un nouveau matériau, qui constitue une partie d'ouvrage, stable.

Cette possibilité ne doit évidemment pas être utilisée pour faciliter le réemploi de matériaux pollués dont l'immersion constituerait un danger pour l'environnement.

Fig. IV-6 Repli d'une structure multicellulaire en vue de sa réutilisation

IV.1.4.5 Conditions de mise en œuvre

IV.1.4.5.a Techniques propres aux travaux à la mer

Aménagements dynamiques

Il s'agit d'action sur les matériaux naturels du littoral à base d'aménagements actifs nécessitant une intervention continue ou discontinue mais perpétuelle.

Ouvrages statiques

Les ouvrages statiques sont des ouvrages en mer ou sur le rivage ne nécessitant a priori pas d'interventions autres que celles relatives à un suivi et un entretien régulier.

IV.1.4.5.b Endommagement lors de la mise en œuvre

Voir III.2.2.2

IV.1.4.6 Comportement à long terme

Voir III.2.2.2

IV.2 RÉHABILITATION DES CORDONS ET MASSIFS DUNAIRES

Face à un problème d'érosion, les interventions envisageables sur les dunes cherchent à assurer la conservation de la plage ; ainsi que la conservation et la protection des dunes et landes côtières.
La nature des aménagements est liée d'une part à l'urgence d'intervention, notamment en cas d'érosion anthropique prononcée ou de désordres résultant d'une tempête, et d'autre part à la nature précise de ces désordres identifiés au travers d'un état des lieux et d'un diagnostic récent.
On se reportera aux chapitres V et VI.

La protection, la conservation et la mise en valeur de cet espace littoral sont ainsi recherchées au travers de mesures indissociables de gestion et d'intervention mécaniques lourdes ou légères qui concilient les objectifs de maintien ou de réparation des dunes et de libre usage du domaine public maritime pour la promenade et la baignade.
Les mesures de gestion visent à gérer la fréquentation du public et comprennent le plus souvent :

- ➔ une information de sensibilisation et d'accompagnement des usagers
- ➔ une organisation du stationnement
- ➔ une limitation des circulations et cheminements

Seuls les véhicules exerçant des missions de secours, de police ou d'exploitation peuvent emprunter des itinéraires identifiés et contrôlés.
Les usagers sont incités à emprunter un cheminement piétonnier sensiblement parallèle au rivage, et en retrait, d'où partent des antennes desservant la plage par des points spécifiquement aménagés où la traversée des dunes est possible.

Les géosynthétiques peuvent être employés dans :

- ➔ les interventions lourdes de reprofilage et colmatage

massif dunaire conteneurisé et renforcé (cf. applications LONGARD ou CORNIC,...)

- ➔ les interventions légères de gestion et mise en défens

brise-vent, séparation sous traversée de dune, séparation sous passage véhicules, natte de renforcement d'une couche végétalisable

IV.3 LES PROTECTIONS DE HAUT DE PLAGE

a) Description:

Il s'agit d'ouvrages longitudinaux se présentant le plus souvent sous la forme de perrés, de murs ou de digues qui s'opposent directement à l'attaque des vagues (figure IV-7). Les protections de haut de plage se rencontrent principalement le long d'infrastructure de transport ou des fronts de mer des secteurs urbains.

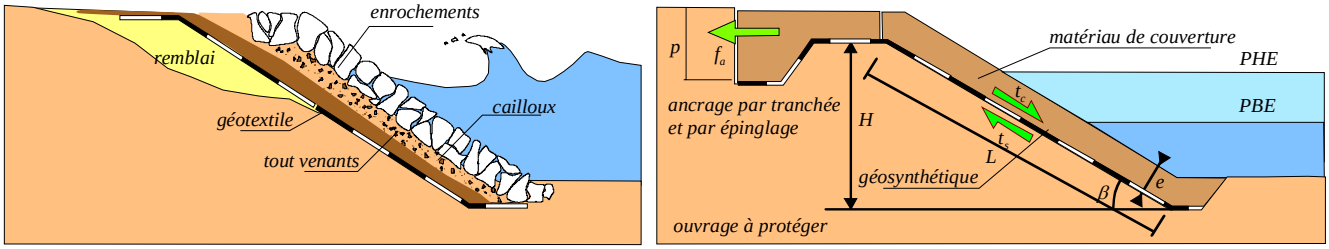


Fig. IV-7 Protection de haut de plages (pour les notations voir le III.2.2.5)

b) Fonctionnement

Les protections de haut de plage fixent le trait de côte et défendent les terrains et installations riverains des effets de la mer. Elles favorisent malheureusement l'érosion des plages par les phénomènes de réflexion qu'elles engendrent et perturbent les échanges cycliques de matériaux selon le profil de plage et entre l'estran et les dunes côtières. Elles ne sont donc à considérer que comme le dernier rempart contre la mer lorsque les installations qu'elles protègent l'exigent.

c) Utilisation possible des géosynthétiques

Ils concernent principalement les protections longitudinales de haut de plage et constituent des solutions variantes des cordons d'enrochements ou des perrés inclinés. De nombreux systèmes ont été expérimentés. Il conviendrait de pouvoir établir une classification suivant la hauteur de houle (h<1, h<4m,... par ex.) et l'éloignement du dispositif par rapport à la ligne du niveau moyen des eaux.

(1) **Constituants principaux:**

- ➔ gabions plats (matelas),
- ➔ matelas textiles remplis de sable ou de béton.

(2) **Constituants fonctionnels:**

- ➔ filtre sous un dispositif de protection souple pour empêcher l'érosion interne,
- ➔ drain sous un dispositif de protection relativement ferme,
- ➔ support de blocs de béton liaisonnés à la nappe géosynthétique.

Ce qui se résume à deux techniques : les géoconteneurs et les filtres sous protection poids.

IV.3.1 Rechargement de plage (PSA et RSA)

Un rechargement de plage cherche à compenser un déséquilibre local du littoral en reconstituant une plage érodée ou à créer artificiellement une nouvelle plage par un apport de matériaux sélectionnés extérieurs au site en érosion.

L'augmentation de largeur de littoral et l'absence de phénomènes d'amplification des houles qui en résultent, contrairement aux ouvrages statiques de protection de haut de plage, permet de dissiper l'énergie des vagues et de limiter les submersions.

Cette technique, lorsqu'elle est correctement étudiée, a des impacts limités sur l'environnement et perturbe peu le fonctionnement des secteurs avoisinants.

Elle s'inscrit donc parfaitement dans une démarche d'aménagement et de gestion durable du territoire qui, tout en contribuant à lutter contre un risque naturel, participe au développement économique en augmentant la surface de plage considérée comme outil balnéaire.

Les géosynthétiques peuvent être employés en anti-contaminant entre le sol existant et le sol d'apport. Le dimensionnement se fait selon des critères de filtration, de non-colmatage et de résistance à l'endommagement lors de la mise en œuvre.

IV.3.2 Établissement d'un transit artificiel

Il s'agit d'un procédé de rechargement par la création de courants. Un système de drainage est installé sous la plage faisant appel aux géotextiles pour l'enrobage des drains. Le dimensionnement du géotextile est celui de l'emploi en tranchée drainante.

IV.3.3 Tube en géosynthétique et géoconteneur (CGC)

Les tubes en géotextile sont des ouvrages adaptés à des faibles hauteurs d'eau. Cette technique n'a pas dépassé pour le moment en France le stade de chantiers expérimentaux.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	++	+++	0	++	++	++	++	0

Fig. IV-8 Protection de haut de plage en sacs

IV.3.3.1 Conditions de mise en œuvre

Très similaire au III.2.3.4

IV.3.3.2 Conditions de stabilité

Identique au III.2.3.5 avec la prise en compte des sollicitations imposées par les vagues et les courants.

IV.3.3.3 Conditions relatives à l'entretien

Cela consiste à les protéger des UV et du vandalisme.

IV.3.4 Filtre du sol support sous une protection (FSP)

Cette application classique consiste à conforter une berge par une protection poids. On intercale un géosynthétique entre la protection poids et le sol pour éviter l'érosion interne[7] de l'ouvrage. Il s'agit ici de répondre au problème de la filtration des sols sous enrochements. Pour trouver plus d'information sur les enrochements, leur caractérisation, leur production et leur utilisation, on pourra se référer au manuel LCPC (LCPC, 1989).

Un type particulier de revêtement, mérite quelques développements (fig. III.5). Il s'agit une tresse préfabriquée de blocs de béton s'emboîtant latéralement les uns dans les autres et reliés dans le sens de la longueur à des câbles intérieurs parallèles. La flexibilité est obtenue dans les deux sens. Un géotextile synthétique perméable prend place à la face intérieure. Le coefficient de réflexion serait voisin de 0,7.

Fig. IV-9 Mise en place d'enrochements sur un géosynthétique

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+	0	0	0	++	++		++	+++	0

IV.3.4.1 Conditions de mise en œuvre

Voir III.2.2.2

La prise en compte des sollicitations externes de chantier comme l'endommagement mécanique n'est

[7] Ce type de risque est traité dans le guide CFG « ouvrages courants ».

pas chose simple. Les enrochements peuvent être déposés sur le géosynthétique bloc par bloc ou en vrac. Dans cette opération, l'énergie de chute développée par les enrochements est convertie en énergie de déformation par le géosynthétique et le sol sous-jacent. Cette opération peut aboutir à la destruction partielle et localisée du géosynthétique, soit au point d'impact (poinçonnement), soit entre deux points d'impact simultanés (traction).

Différents facteurs influencent les dommages :

- ➔ hauteur de chute,
- ➔ taille et forme des enrochements,
- ➔ type et résistance du géosynthétique,
- ➔ dépôt en vrac ou bloc par bloc,
- ➔ compressibilité du sol et
- ➔ saturation du sol.

Les deux derniers points ainsi que la forme des enrochements semblent négligeables. Il résulte que la hauteur de chute doit être faible, qu'il est préférable de mettre en place bloc par bloc et que les non-tissés résistent moins à ce type de sollicitation que les tissés. Dans le cas d'un lâcher au-dessus de l'eau, une partie de l'énergie cinétique est absorbée lors de la pénétration dans l'eau.

IV.3.4.2 Conditions de stabilité

Identique au III.2.2.5 avec la prise en compte des sollicitations imposées par les vagues et les courants.

Aux fonctions classiques des géosynthétiques : filtration et séparation, il faut ajouter les fonctions :

- ➔ résistance de surface à l'érosion due aux vagues et au courant,
- ➔ résistance au soulèvement, fonction assurée dans un filtre granulaire par le poids des matériaux
- ➔ confinement des particules sous le revêtement.

L'épaisseur du revêtement contribue à l'amortissement des fluctuations de pression tandis que le poids du revêtement contribue à la capacité de résistance du sol sous-jacent à résister aux contraintes de cisaillement (confinement par pression) limitant les glissements de peau et ruptures circulaires.

Le dimensionnement d'un revêtement géosynthétique destiné à protéger une pente contre l'érosion due aux vagues et aux courants doit répondre à deux exigences contradictoires :

- ➔ d'un côté le revêtement doit être suffisamment perméable pour permettre de diminuer les surpressions créées dans la pente par les variations du niveau de l'eau et générant des soulèvements,
- ➔ d'un autre côté ce revêtement doit être suffisamment fermé pour empêcher le transfert des surcharges hydrostatiques (amortir) à l'intérieur du massif.

Ainsi il est recommandé de placer un revêtement peu perméable au-dessus des moyennes eaux et un revêtement perméable au-dessous.

Rappelons que dans ce type de complexe, la variation de la perméabilité doit être graduelle et croissante du massif vers la surface, avec globalement un ratio de 10 entre la perméabilité du sol et du géosynthétique. L'ouverture des pores du géosynthétique doit être inférieure à la taille des particules du sol. Cette diminution de la perméabilité de la surface vers l'intérieur favorise l'amortissement de la charge hydraulique (variation cyclique de dépression-surpression) dues aux vagues ou aux turbulences dues au courant initiateur de la liquéfaction du sol.

Dans le cas d'une protection de surface par blocs, la recommandation de variation de perméabilité graduelle ne peut être atteinte. Pour diminuer la pression de soulèvement, il est nécessaire d'autoriser un débit de fuite par une porosité apparente de surface (Pylarczyk et al., 1994 et 2000).

Il existe des règles de dimensionnement spécifiques à ce matériau, basées sur des études menées au Laboratoire Hydraulique de Delft en 1983. Le dimensionnement du géosynthétique s'effectue selon des critères de filtration, de non-colmatage et de résistance à l'endommagement mais également selon contraintes mécaniques à la mise en œuvre, selon la tenue imposée par les agressions et la tenue du sol support.

IV.3.4.3 Conditions relatives à l'entretien

Le procédé a été mis en œuvre à l'étranger notamment aux E.U. au Canada et aux Pays-Bas, surtout

en protection de rives. Il a également été utilisé en protection de plage à Barneville (Manche) où son comportement a été mis en défaut. Dès la mise en place, des déformations importantes ont été constatées. La rupture a eu lieu lors d'une petite tempête. Le domaine de validité de ce produit se réduirait aux hauts de plage soumis à des agitations modérées.

Comportement à long terme : UV,
Colmatage (blocking et cloging),
Chimique : Sécrétions animales et végétales.

IV.4 ESTRAN

On ne saurait trop rappeler que la mise en place d'un brise-lame ou d'un épi modifie le transit littoral des sédiments localement, c'est l'objectif, mais aussi en aval. En effet, retenir les sédiments sur une plage peut avoir des conséquences sur une zone proche de la côte (par exemple Criel-sur-Mer en 1997).

Cas des brise-lames

Les géosynthétiques ainsi que les enrochements permettent une meilleure intégration dans le paysage, mais sont plus absorbants, plus résistants et faciles à réparer, que les murs de protection. Mais si les ouvrages longitudinaux fixent le littoral, ils ne permettent pas toujours de préserver les plages en avant de ces ouvrages, et encore moins de les développer. Ils tendent même à favoriser le départ des sédiments par la réflexion induite des lames déferlantes, sur les ouvrages. De plus ces constructions s'opposent aux échanges sédimentaires en s'interposant entre dunes littorales et plages, et peuvent aggraver l'érosion par ce biais.

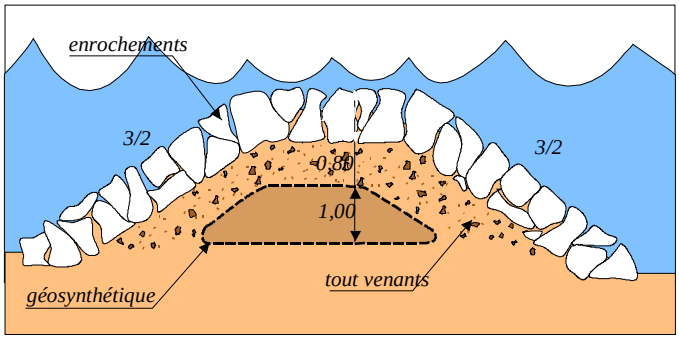


Fig. IV-10 Brise lame en enrochement

Fig. IV-11 Épis en enrochement et en gabions

Cas des épis

L'épi jouant son rôle de rétention, les sédiments ne le franchissent plus, la dérive littorale est enrayée. Résultat : au delà de l'épi, les sédiments se font rares et même à faible marée, la mer bat la côte de plein fouet. Il peut être alors nécessaire de mettre en place une protection (le pied des falaises contigues dans le cas de Criel) par des enrochements afin d'éviter que la houle ne les frappe directement et d'assurer ainsi une érosion trop importante.

Les travaux d'aménagement doivent s'appuyer sur plusieurs années d'observations (levers photogrammétriques, suivi sédimentologique et calcul de volume). Mêmes données que pour les protections de haut de plage, même emploi des géotextiles, mêmes conditions de dimensionnement.

a) Description:

Il s'agit d'ouvrages longitudinaux (sensiblement parallèles à la côte) se présentant généralement sous la forme d'une digue en enrochements submersible ou non et implantée sur le bas estran ou par faibles profondeurs.

b) Fonctionnement:

Les brise-lames agissant par atténuation des effets de la houle et création d'une zone favorable à la sédimentation par :

- ➔ limitation du franchissement et déferlement de la houle, absorbant ou réfléchissant ainsi une partie de son énergie.
- ➔ modification des mouvements sédimentaires liée aux phénomènes de diffraction de la houle aux musoirs du brise-lames.
- ➔ blocage des matériaux se déplaçant vers le large selon le profil de plage.

c) Utilisations possibles des géosynthétiques :

(1) **Constituants principaux du brise-lames:**

Ce sont essentiellement les utilisations de conteneurs géosynthétiques (gabions parallélépipédiques dont l'enveloppe est à base de géogrille et qui sont remplis de matériaux granulaires ou conteneurs cylindriques à base de géotextiles tissés ou non-tissés remplis de matériaux sableux).

Fig. IV-12 Épis et brise lames en conteneur

(2) **Constituants fonctionnels:**

Selon la position du géosynthétique dans la structure de l'ouvrage il agira en tant que:

- système de renforcement de l'ouvrage à sa base, notamment en cas d'hétérogénéité et de mauvaise portance des sols supports. Les fonctions assurées seront par ordre d'importance, la séparation, le renforcement et la filtration.

Le géosynthétique pourra se présenter sous la forme

- ➔ d'une nappe associée à un tapis de fascines,
- ➔ d'une nappe supportant des pavés béton,
- ➔ de géogrilles,
- ➔ de gabions plats.

- Dispositif anti-affouillement au pied du brise-lames et au voisinage des musoirs. Les fonctions assurées seront, la filtration et la séparation.

Le géosynthétique peut être constitué :

- ➔ d'une nappe géotextile,
- ➔ d'une structure complexe comprenant la superposition de nappes de natures différentes ou de matériaux assurant rigidification et protection.

Suppression des sous-couches et du noyau.

IV.4.1 Filtre du sol support sous une protection (FSP)

Les épis réalisés à l'aide d'enrochements sont généralement constitué d'un noyau en sol fin placé dans un géotextile et surmonté par une protection poids. Les épis sont des talus en enrochement de faible hauteur, orientés à peu près perpendiculairement au littoral pour le protéger contre l'érosion en retenant les sédiments. On intercale un géosynthétique entre la protection poids et le sol pour éviter l'érosion interne[8] de l'ouvrage. Comme pour le brise-lames en enrochements, il s'agit de répondre au problème de la filtration des sols sous enrochements.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+	0	0	0	++	++	0	++	+++	0

IV.4.1.1 Conditions de mise en œuvre

Deux méthodes de construction peuvent être envisagées : par voie terrestre ou par voie maritime. Cependant le coût de cette dernière étant très élevée, une construction par voie terrestre similaire aux méthodes de construction des brise-lames traditionnels semble préférable. Elle se déroule en

[8] Ce type de risque est traité dans le guide CFG « ouvrages courants ».

quatre phases :
1) Création d'un passage pour les engins de construction jusqu'au site de construction,
2) Prolongement du passage protégé par un batardeau à l'avancement suivant l'implantation de l'ouvrage avec les matériaux de protection du noyau en tout-venant,
3) Approvisionnement et fermeture du noyau,
4) Arase du passage à la cote voulue et recouvrement par les blocs lourds,
5) Démantèlement du passage, en laissant un seuil si nécessaire.

IV.4.1.2 Conditions de stabilité

Ces ouvrages s'implantent par des fonds moyens, sur des sols de bonne tenue. Ils sont peu réfléchissants et jouent un rôle favorable dans l'agitation du plan d'eau protégé. Les questions critiques quant à ces ouvrages, comprennent, entre autres : les forces des vagues, la stabilité et les dommages, le franchissement et la réflexion des vagues, l'affouillement et la protection de la base, l'impact sur l'environnement maritime.

La taille des enrochements doit être adaptée aux conditions hydrodynamiques du milieu, pour éviter un démantèlement.
Pour stabiliser ce type d'ouvrage, les ingénieurs hollandais, puis français, ont coulé du mastic ou du béton de liaisonnement dans les vides laissées par les enrochements. Cette méthode est assez coûteuse pour des travaux de faible envergure et grâce aux matériels de chantier actuel, on préfère augmenter la taille des blocs rocheux.

IV.4.1.3 Conditions relatives à l'entretien

Ces ouvrages sont les plus utilisés pour la protection des côtes. Ils présentent l'avantage d'être d'une implantation simple et généralement relativement peu coûteuse et ne nécessitent pas d'entretien fréquent. De plus, ils offrent une sécurité importante car leur ruine est rarement immédiate et complète. La démolition de la carapace par les lames est progressive. Les blocs de la première couche sont déplacés, puis ceux de la deuxième couche dans le cas général d'une carapace à deux couches de blocs. C'est seulement après que des matériaux plus petits sont exposés à l'attaque directe de la houle. Ce phénomène devient alors irréversible. Mais parallèlement, les blocs qui ont roulé adoucissent la pente et ralentissent sa destruction. La réparation est rapide à condition bien sûr de disposer des matériaux et des engins nécessaires.

IV.4.2 Système de confinement géoconteneurs (CGC)

Parmi les ouvrages de confinement géoconteneur de type tube, on peut distinguer deux procédés : le procédé LONGARD et le procédé CORNIC.
Ces procédés utilisent des tubes ou boudins géotextiles remplis de sable qui permettent de créer un aménagement de protection de dunes littorales. Ceux-ci permettent la réalisation d'épis, la protection des pieds de dune et la stabilisation générale d'une plage lorsqu'ils sont disposés sous forme de quadrillage (figure IV-13).

Toutefois certain procédés (Cornic par exemple) visent à limiter les mouvements de plage dans le profil et s'attachent à ne pas interrompre les échanges entre le haut de plage et la dune. Cela consiste à disposer perpendiculairement à la ligne de rivage des éléments ou modules enfouis dans la plage à environ deux mètres de profondeur et suivant une pente de l'ordre de 15 % (figure IV-14). Dans ce cas, il faut en outre noter que ce procédé représente une technique de défense frontale de haut de plage ou de cordon dunaire et qu'il ne saurait donc se subsister à d'autres types d'ouvrage, des brise-lames par exemple.

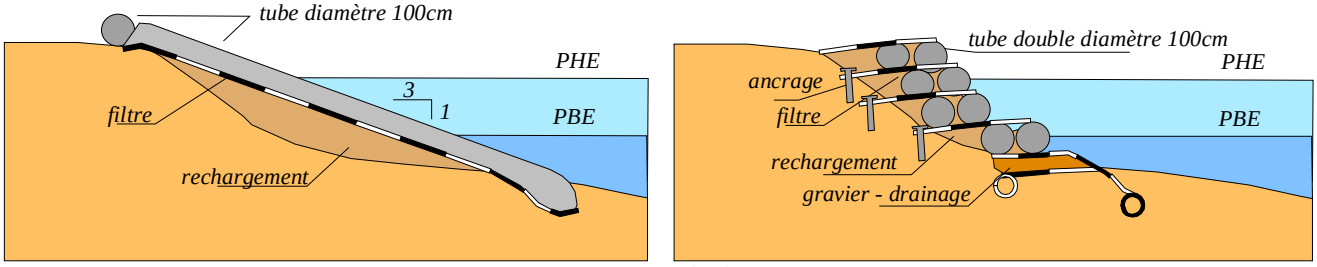


Fig. IV-13 Procédé Longard

Les sacs géotextiles renfermant du sable se composent soit d'une toile imperméable en d'épaisseur millimétrique et d'une enveloppe extérieure en fibre synthétique tissée, soit d'une enveloppe composée d'un géotextile non tissé et d'un filet. Les diamètres varient de quelques décimètres à plusieurs mètres pour des longueurs avoisinant plusieurs dizaines de mètres en longueur mais pouvant aller jusqu'à une centaine de mètres. Un filtre géotextile peut prendre place sous les tubes afin de limiter les érosions. Ce tapis peut être lesté de graviers ou de tout venant.

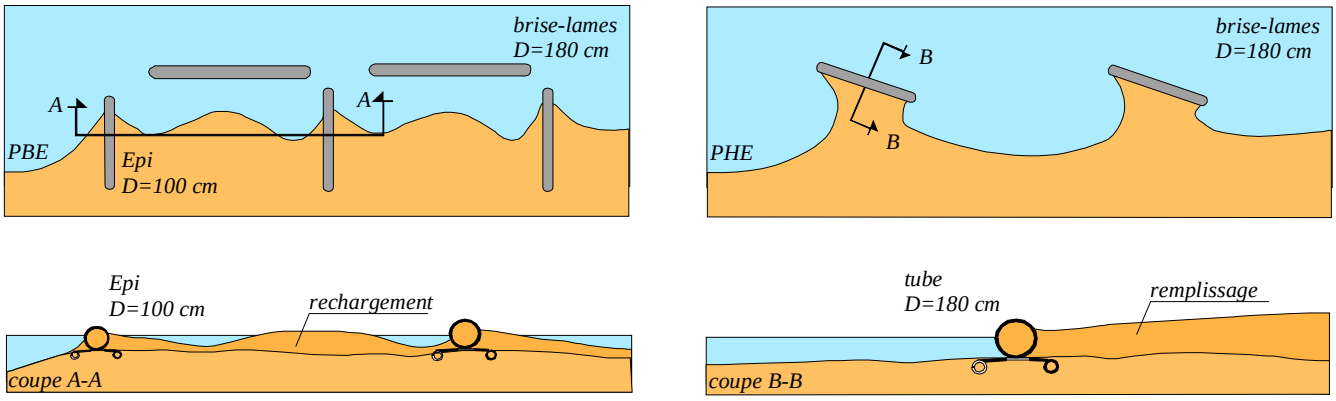


Fig. IV-14 Applications du procédé

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	+	++	0	0	0

IV.4.2.1 Conditions de mise en œuvre

Les tubes sont livrés sur le chantier fermés à une extrémité. Celle-ci reçoit une soupape permettant d'évacuer l'eau de remplissage, l'autre extrémité se raccordant à la tuyauterie par l'intermédiaire d'un joint. Le remplissage des tubes s'effectue à l'aide d'une pompe refoulant sous pression l'eau vers une trémie alimentée en sable par un chargeur.
Avant le remplissage proprement dit, le tube est gonflé à l'air ou à l'eau afin de vérifier sa géométrie et l'absence de défaut.
La mise en œuvre des modules requiert l'exécution de terrassements relativement importants. Ils sont ligaturés les uns aux autres et disposent en partie basse côté mer d'une fixation dans le sol sous-jacent par l'intermédiaire d'un excédent de filet. La mise en place par barges spécifiques peut être effectuée.
Le dispositif est éventuellement complété par l'installation de ganivelles ou par une fertilisation du sable assurant une revégétalisation rapide du haut de plage, le géotextile favorisant le maintien des racines des plantes.

IV.4.2.2 Conditions de stabilité

Le géotextile doit répondre à deux critères essentiels :

- ➔ filtration = risque de vidange du conteneur
- ➔ tenue face aux sollicitations imposées par la déformation du support = risque de rupture ou de mouvement du conteneur.

Outre les modifications dimensionnelles des "conteneurs", une variante consiste à protéger vis à vis de l'abrasion le tiers central du dispositif pour un géotextile tissé polyamide renforcé par une structure composite en polyester et carbone imprégné de sable. Ce nouveau système devrait disposer d'une meilleure capacité drainante.

IV.4.2.3 Conditions d'entretien

Ces procédés exercent une influence positive sur l'enracinement des oyats en haut de plage.
Il est probable qu'un minimum de surveillance et d'entretien soit nécessaire. En effet, si les modules se retrouvent découverts, ils peuvent contribuer à accélérer le processus d'érosion par réflexion de la houle sur le revêtement. Les modules existants ont été découverts à diverses reprises (mouvements dans le profil). Des rechargements de sable ont été nécessaires pour assurer un recouvrement suffisant des modules.

Si le géosynthétique est découvert et est fortement endommagé, le procédé peut être détruit. Il faut souligner ici le problème du vieillissement des géotextiles qui, pour ce procédé, est particulièrement sensible et ne pas négliger celui du vandalisme ou du choc de déchets flottants (comme des troncs d'arbres), les boudins y étant immédiatement soumis.

IV.4.3 Système de confinement géoalvéolaire (CGA)

En protection de bordures de talus, il semble que le complexe alvéolaire soit efficace s'il n'y a pas d'agression directe des vagues Le talus est maintenu et la végétation s'installe rapidement.
Le principe consiste tout simplement à piéger des matériaux dans des alvéoles, limitant ainsi leur mobilité. Les géoalvéoles peuvent être complétées ou non par un géotextile fixe à leur face inférieure. Le traitement vis-à-vis des U.V. est indispensable.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	++	++	0	0	0	0

IV.4.4 Nattes de renforcement du sol d'apport (RSA)

Réservé exclusivement à la stabilisation superficielle des talus à l'origine, on peut envisager l'utilisation de ce matériau en défense de dune. Comme pour les panneaux de géoalvéoles, un soin particulier doit être apporté lors de la pose, à réaliser sur un terrain aussi bien réglé que possible, au niveau des recouvrements de nappes et des ancrages de la structure dans le sol.
Cependant, on ne mettra en place ce type de protection que dans des endroits où la dune n'est pas très exposée et où la mer n'atteint les matériaux que par forts coefficients de marée. La natte peut se vider quelque peu de ses matériaux de remplissage, les gravillons formant une "poche" en pied de protection.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+	++	+++	0	+	+	0	++	0	0

IV.5 EN MER

IV.5.1 Les herbiers (VEG)

Les matériaux recouvrant l'estran et les petits fonds participent à l'équilibre biologique et morphologique du littoral. Qu'il s'agisse de minéraux ou de végétaux, il convient de favoriser le maintien de leur distribution en espèces et leur répartition spatiale.
Ceci passe le plus souvent par des mesures de gestion et de protection simples qui consistent à respecter les évolutions et cycles naturels du littoral (contrôle, voire interdiction des extractions de sables et galets, remodelage limité du profil de plage, remise en place saisonnière des matériaux déplacés par les houles d'hiver, limitation des mouillages forains,...).

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+	+++	++	0	++	++	0	0	0	0

a) Description :

Un point particulier concerne les herbiers de posidonies. Cette plante à fleurs (phanérogame) endémique de la Méditerranée se rencontre entre 0 et 40 m de profondeur. Elle est constituée de rhizomes d'où émergent des racines. Des faisceaux de feuilles rubanées, larges d'un centimètre environ et longues de vingt centimètres à un mètre, se dressent depuis ces rhizomes avec une densité atteignant 1000 faisceaux de quatre à huit feuilles par mètre carré (figure IV-15 à 17).

b) Fonctionnement :

Outre le fait de constituer un biotope très riche, elles contribuent à fixer les fonds et à limiter l'érosion : la lente croissance horizontale des rhizomes et verticale des feuilles constitue des mattes, coussins de posidonies mortes mêlées au sable qui stabilisent les fonds ; et les feuilles modifient les phénomènes hydrodynamiques locaux provoquant ainsi un piégeage des sédiments en mouvement.

Amortisseurs des houles et des vagues par leur épaisse et haute frondaison et piège à sédiments par les feuilles et le lacis serré de leurs rhizomes, les herbiers jouent un rôle capital dans la stabilité des fonds meubles et des rivages. L'efficacité de cette protection du littoral est clairement démontrée par les conséquences en cascade pouvant résulter de sa disparition :

- ➔ creusement et instabilité des fonds,
- ➔ divagation générale des particules, synonyme d'entrave à l'installation des peuplements benthiques,
- ➔ érosion ou engraissement des plages,
- ➔ ensablement des ports par entraînement des sédiments vers le large ou vers le rivage en fonction des circonstances hydrodynamiques, engendrant une entrave certaine à l'utilisation du littoral en général et des ports et zones balnéaires en particulier.

c) Utilisations possibles des géosynthétiques :

Bien que cette plante soit inscrite sur la liste des espèces végétales marines protégées depuis 1988, des efforts complémentaires sont entrepris pour favoriser son développement et reconstituer les herbiers détruits par le passé.

Les géosynthétiques peuvent être utilisés :

- ➔ dans les transplantations de boutures, où des géogrilles fixent les sédiments support de culture
- ➔ pour constituer des dispositifs de posidonies artificielles

Ces techniques, dont les premiers résultats sont encourageants, restent toutefois encore expérimentales.

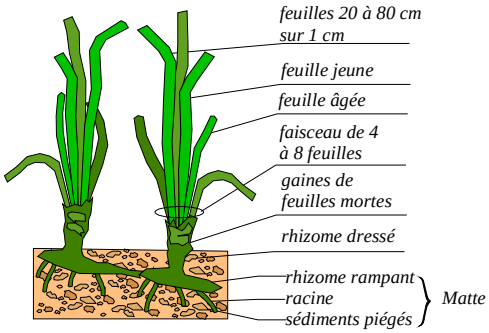


Fig. IV-15 schéma posidonie

Fig. IV-16 massif de posidonies

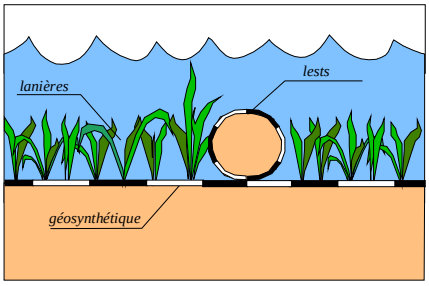


Fig. IV-17 herbiers artificiels

IV.5.2 Système de confinement géoconteneur (CGC)

Ouvrages immergés

La mise en place d'ouvrages immergés de type épis diminue le transit littoral lié à l'orientation par rapport au rivage des phénomènes de swash et ressac provoqués par la houle, et de type bermes permet de limiter le phénomène d'érosion car la diminution de l'épaisseur de la tranche d'eau réduit la propagation de la houle vers le rivage en augmentant les effets de freinage dus à la réfraction des vagues dans les eaux littorales.

Les ouvrages de type tube sont bien adaptés aux travaux d'urgence mais n'ont pas donné satisfaction dans le long terme, car ils sont souvent victimes du vandalisme ou de chocs de déchets flottants.

Ouvrages flottants

Il existe des brise-clapots constitués, par exemple, de pneus liés ou d'un ponton flottant et d'une jupe géosynthétique dont le dimensionnement est à l'heure actuelle expérimental. Ces ouvrages ont plutôt vocation à être temporaires.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	+	+	0	+	+	0

IV.5.3 Filtre du sol support sous une protection (FSP)

Cette application classique consiste à conforter le fond marin par une protection poids. On intercale un géosynthétique entre la protection poids et le sol pour éviter l'érosion interne de l'ouvrage.Cette application est identique au IV.3.4.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+	0	0	0	+	+	0	++	+++	0

V ÉROSION ÉOLIENNE

V.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES

L'érosion éolienne intéresse différents types d'ouvrages (figure V-1):

- ➔ les dunes et les plages de sable,
- ➔ la montagne.

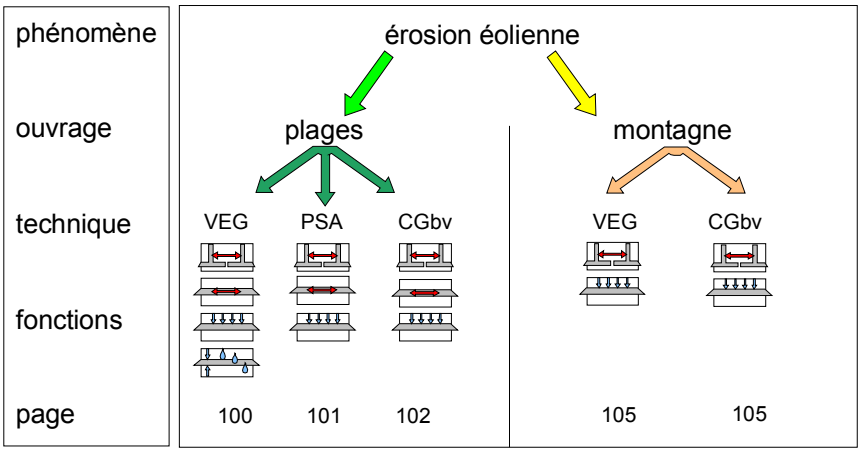


Fig. V-1 Organigramme de choix

V.1.1 Technique de lutte contre l'érosion éolienne

L'absorption d'une partie de l'énergie du vent par des obstacles non érodables est sans doute une composante majeure de la dynamique de l'érosion éolienne. Les éléments non-érodables absorbent une partie de l'énergie éolienne et il en résulte une protection relative de la surface érodable. La lutte contre l'érosion éolienne se caractérise donc par la capacité à mobiliser ou mettre en œuvre ses éléments non érodables.

Les solutions habituelles visent à minorer les effets de l'érosion éolienne par réduction de la vitesse du vent en surface et donc sa capacité de transport en vue de la reprise de la végétation. Elles visent plus à contrôler l'évolution qu'à la bloquer.

Deux éléments participent à la caractérisation de l'interface atmosphère/sol : l'état de surface et le taux de couverture végétale (cf. schéma de principe de l'érosion au §I.1.4). Pour atteindre ces objectifs plusieurs solutions sont possibles :

1. mise en place de brise-vent
2. couverture totale de tout ou partie de la dune. Il est possible de mettre en place une Natte de Renforcement du Sol d'Apport ou un Géosynthétique de Protection du Sol d'Apport ou un Géoconteneur permettant une protection lourde associant béton et géotextiles
3. Mise en place d'une végétation adaptée

Ces trois solutions sont fréquemment utilisées conjointement.

V.2 DUNES, PLAGES[9]

V.2.1 Condition de milieu :

L'évolution des dunes est influencée par la dynamique morphosédimentaire de la partie supérieure de la plage et dépend tout d'abord de la présence d'un stock de sable suffisant, aux caractéristiques granulométriques et cohésives permettant un transport par le vent. Les volumes d'apport éoliens vers

[9] On ne considérera ici que le «haut de plage », à l'exclusion de « l'estran » portion du littoral comprise entre les plus hautes et les plus basses mers soumise à l'érosion marine

la dune sont fonction de la fréquence des vents de vitesse supérieure au seuil de déflation et de leurs directions.

L'élévation du profil de la plage entraîne une augmentation de la vitesse du vent pouvant aller jusqu'à 70%. La pente du versant marin de la dune joue cependant un rôle déterminant sur ses évolutions, favorisant notamment l'accrétion lorsque les pentes sont inférieures à 30%.

Les hauts de plage immergés lors des plus grandes marées - ou exceptionnellement lors des tempêtes pour les parties les plus élevées - constituent également des zones d'envoi du sable ou de fort transit sableux.

V.2.2 Protection végétale (VEG)

Il s'agit de la mise en place d'une végétation adaptée (figure V-2). Il n'existe pas d'expérience recensée d'emploi de géosynthétiques même s'il y a possibilité d'emploi de collerettes en fibre végétale ayant un effet de rétention d'eau ou stabilisation temporaire de la dune par un gélifiant

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	++	++	0	0	++	+	0	0	0	+

Fig. V-2 dunes végétalisées

V.2.2.1 Sélection, mise en œuvre et entretien de la végétation

Peu d'espèces de plantes sont aptes à survivre et à se développer dans les conditions très sévères qui leur sont imposées dans le sable, en bord de mer. Elles doivent être capables de supporter l'effet abrasif et l'accumulation du sable, l'exposition au plein soleil, des températures de surface élevées, des inondations occasionnelles par de l'eau salée et la sécheresse. Celles qui survivent effectivement sont des plantes vivaces de longue durée de vie à rhizomes ou à stolons, comportant des systèmes de racines étendus, des tiges capables d'une rapide croissance vers le haut à travers du sable en train de s'accumuler et une tolérance aux embruns salés. Il convient de choisir soigneusement les espèces, sur la base d'un examen de la végétation locale, puis d'exécuter correctement les plantations et de les entretenir (figure V-3).

Le cakilier

Le chiendent maritime

L'oyat

Le panicaut

L'euphorbe

Le liseron des sables

Fig. V-3 Flore utilisée

La première plante à se développer est le cakilier. On l'appelle aussi coquillier maritime ou roquette de mer. C'est une plante herbacée assez basse. Il a des racines rampantes, des tiges couchées, des feuilles charnues, entières et luisantes Ensuite va s'implanter le chiendent maritime. Le chiendent maritime est une graminée à la tige creuse, aux feuilles plates, en rubans. Pour s'assurer une bonne fixation dans la dune mouvante, il a des racines profondes, longuement traçantes qui agissent comme un grillage arrêtant le déplacement du sable. C'est la plante qui supporte le mieux le sel apporté par les embruns de la mer.
Sur les hauteurs exposées au vent pousse l'oyat, aux feuilles fines, enroulées et allongées. Cette plante va retenir le sable, l'empêcher d'avancer et ainsi fixer la dune. On l'appelle aussi gourbet ou roseau des sables. C'est une plante herbacée, à la tige creuse, pouvant atteindre 1m de haut. Ses feuilles, d'un gris-bleuâtre, sont en rubans, raides à pointes aiguës. Elles sont enroulées sur elles-mêmes lorsque le temps est sec et s'ouvrent à la rosée ou à la pluie. Sa tige forme des nœuds. Il fleurit en juin en formant des épis. L'euphorbe, le panicaut des sables et le liseron des sables sont également caractéristiques de la dune blanche.

V.2.2.2 Disposition des plantations

Pour fixer la dune, on plante des oyats en ligne, face au vent. A mesure que le sable monte, l'oyat monte aussi et forme des racines à partir du nœud le plus proche de la surface. Toutes les plantes qui poussent dans la dune ne peuvent se développer que lorsque l'oyat a arrêté le sable.
L'écartement des plants et le mouvement du sable doivent être pris en considération pour déterminer la largeur de la zone plantée. Quand peu de sable se déplace pour être piégé et que les plants sont serrés, presque tout le sable est attrapé le long du côté mer de la plantation et il se forme une dune à base étroite. Quand, pour des conditions semblables de mouvement du sable, les plants sont moins serrés du côté mer, il se forme une dune à base plus large. Cependant, la vitesse de croissance des plantes limite la durée pendant laquelle elles seront effectivement moins serrées du côté mer. L'écartement et la disposition doivent être déterminés en fonction des caractéristiques du site et des objectifs de la plantation.
L'exemple suivant illustre les relations entre la largeur de la plantation, l'écartement des plants, le volume du sable et la vitesse de croissance des plantes. Des roseaux des sables américains plantés sur les Outer Banks de la Caroline du Nord (U.S.A.) à 45 cm de distance avec un espacement extérieur de 60 à 90 cm, ont accumulé du sable sur une grande part de la largeur de la plantation pendant les deux premières saisons. Vers la fin de la deuxième saison, la couverture de plantes était si complète le long de la face de la dune côté mer que la plus grande partie du sable était piégée dans les 8 premiers mètres de la dune.
Le roseau des sables américain s'étend de manière typique vers l'extérieur par développement de son rhizome et, quand il est planté selon une bande parallèle à la cote, croit vers la mer en piégeant le sable. Ainsi une dune peut-elle se construire vers la plage à partir de la plantation d'origine.

V.2.3 Géosynthétiques de protection de la couche végétalisable (PSA)

Le rôle d'une couverture est de réduire ou annuler la vitesse du vent au sol et/ou d'assurer la cohésion du sol en cas de végétalisation artificielle. Les couvertures à plat peu épaisses ont un effet contre la déflation, les couvertures épaisses un rôle d'accumulation dans les zones de transit sableux.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	++	++	0	0	+++	+++	0	0	0	0

Les matériaux généralement utilisés sont des petits ligneux, genet et brande (bruyère à balai) ou des branchages de gros ligneux comme les houppiers de pin (résidus de coupe).
Dans les hauts de plage les couvertures épaisses de branchages sont efficaces dans les zones d'accélération (par compression) telles que des brèches, couloirs brise-vent.
Les matériaux géosynthétiques ne semblent pas être utilisés en couverture. Les nattes, géomats, paillassons, géogrilles 3D, géoalvéoles etc... devraient pouvoir être largement employés ; les conditions de mise en œuvre restent à déterminer. On peut envisager la mise en place de protection lourde associant béton et géotextiles.
A l'heure actuelle, le dimensionnement est empirique selon l'expérience du fabricant. Il devrait pouvoir y avoir un dimensionnement du géotextile selon les contraintes mécaniques à la mise en œuvre, selon la tenue imposée par les agressions et la tenue du sol support, selon les conditions de filtration et de non-colmatage.

V.2.4 Système de Confinement Géoalvéolaire par brise-vent (CGAbv)

Les écrans semi-perméables sont plus efficaces que les écrans imperméables par effets de diffusion et turbulence (figure V-4). Ils comprennent les palissades ; de planches ou végétaux, les fascines, les cordons de végétaux tressés ou de branchages en fagots et les « filets ou grilles synthétiques ». Les brise-vents synthétiques sont à installer dans les zones à fort transit sableux : pied de falaise morte d'érosion marine, excavations ouvertes sur la mer.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	++	++	0	0	++	+	0	0	0	0

V.2.4.1 Choix des matériaux:

De nombreux types de barrières sont utilisés : essentiellement barrières à neige préfabriquées en lattes de bois (chataîgnier), mais aussi fagots, pieux isolés, tissu en plastique, tissu en jute.

Fig. V-4 palissades et brise-vents

Les filets ou grilles synthétiques peuvent être à mailles carrées, losangiques, hexagonales, soudées, tressées ou tricotées. Les dimensions des mailles généralement adoptées sont comprises entre 0,5 cm et 9,5 cm (dans la plus grande dimension). La hauteur des différents écrans varie de 0,5 m à 1 m.
Le dimensionnement s'effectue en fonction de la perméabilité à l'air, la résistance en traction et l'allongement. D'une façon générale on veillera à respecter la prescription suivante : D : distance du brise-vent par rapport à l'obstacle à protéger et H : hauteur du brise-vent.

- ➔ D>25.H pour un obstacle poreux de 40 à 60 %
- ➔ D>10.H pour un obstacle opaque.

A titre d'exemple, la vitesse du vent est modifiée sur une distance de 20 à 25 fois la hauteur de l'écran pour une porosité[10] de 50% et un terrain plat. La réduction de vitesse est de 30 à 50% à une distance comprise entre 2 et 10 fois la hauteur (figure V-5). En l'absence de données, un

[10] Rapport de la surface des ouvertures à la surface totale. On utilise aussi les termes densité et perméabilité.

dimensionnement empirique réalisé selon l'expérience du fabricant peut permettre la mise en place d'une planche expérimentale.

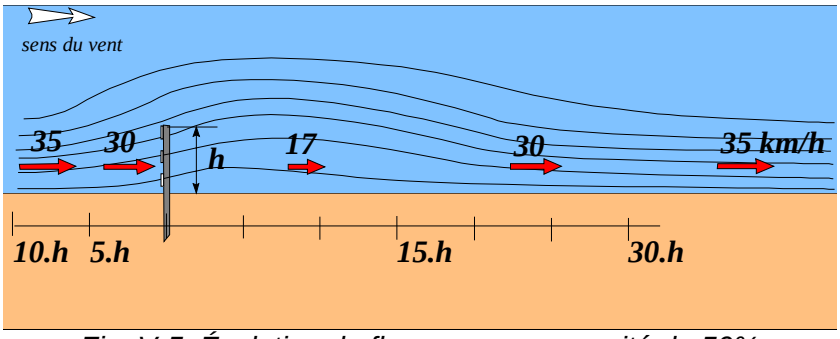


Fig. V-5 Évolution du flux pour une porosité de 50%

La porosité de la barrière doit être de l'ordre de 50 %, avec des surfaces ouvertes et fermées de moins de 5 cm de largeur unitaire. Les barrières à neige standard en bois apparaissent de ce point de vue les plus pratiques, pour un coût modéré.

V.2.4.2 Implantation - Mise en œuvre.

Un certain nombre de principes peuvent être dégagés de l'expérience acquise.

- ➔ Seules des barrières droites sont recommandées. L'utilisation de retours ou une implantation en zig-zag n'augmentent pas suffisamment l'efficacité du piégeage pour s'avérer économiquement intéressantes. Des retours latéraux peuvent être utilisés pour de faibles longueurs de barrières de moins de 150 m, car du sable peut alors être perdu autour de leurs extrémités.
- ➔ Il est primordial que la barrière soit placée à une distance convenable, côté terre, de la crête de berme. Elle doit être assez éloignée de la crête de berme pour être à l'abri d'attaques des lames fréquentes. Les meilleurs résultats ont été obtenus quand sa position a été choisie en coïncidence avec la ligne de végétation et de dunes frontales naturelles prédominant dans le secteur. Cette distance est habituellement de plus de 60 m à terre de la crête de berme.
- ➔ La barrière doit être parallèle à la ligne de rivage, même si elle n'est pas alors perpendiculaire à la direction des vents dominants.

Ces types de brise-vent sont mis en place sur des piquets espacés de 1 m à 5 m selon les cas, 1e filet ou la grille étant plaqués contre les piquets du côté du vent. Le pied de l'écran doit être bien au contact avec le sable, voire en partie recouvert.

Deux méthodes sont habituellement utilisées pour la mise en place de barrières:

- ➔ installation d'une seule barrière et adjonction de barrières simples supplémentaires au fur et à mesure qu'elles se remplissent (figure V-6).

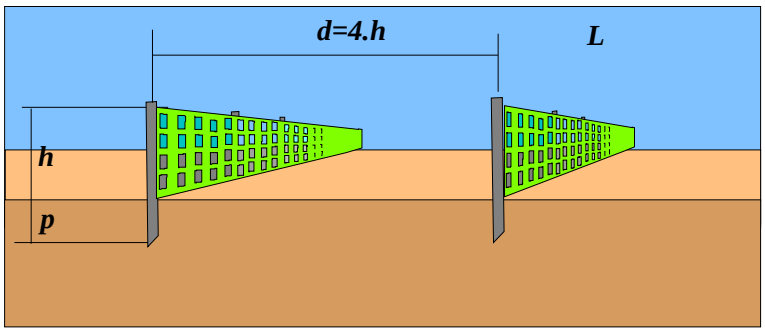


Fig. V-6 Espacement des brises-vents

- ➔ installation de deux barrières distantes d'environ quatre fois leur hauteur et adjonction de barrières doubles supplémentaires au fur et à mesure qu'elles se remplissent (figure V-6).

Les barrières simples sont en général préférables sur le plan économique, surtout pour les faibles vitesses de vent, mais les barrières doubles peuvent piéger le sable plus vite pour des vitesses de

vent élevées. Le dispositif le plus courant se compose de rangées parallèles perpendiculaires aux vents dominants. L'espacement entre les lignes dépendra de la hauteur du brise-vent de la pente et de 1'exposition du terrain et de l'objectif (contrôle du transit sableux ou blocage pour combler une excavation). Dans le cas fréquent où les vents dangereux soufflent de plusieurs côtés, on procède à un carroyage dont les dimensions seront d'autant plus petites que les vents sont violents. Ils peuvent varier entre 5 x 5 et 8 x 8 dans les conditions habituelles.

V.2.4.3 Conditions d'entretien.

Pour une porosité de 50 %, la barrière est habituellement remplie à sa capacité en un an, la dune étant alors à peu près aussi haute que la barrière. Les pentes de la dune s'échelonnent d'environ 4/1 à 7/1, en fonction de la taille des grains de sable et de la vitesse du vent

- La hauteur de la dune s'accroît de la façon la plus efficace en plaçant les levées successives près de la crête d'une dune existante. Cette disposition conduit toutefois à une réduction progressive de la hauteur efficace des barrières successives et à des difficultés de mise en place des barrières au fur et à mesure que la dune devient plus haute et plus raide.
- La largeur de la dune est augmentée en plaçant les levées successives parallèlement à la barrière existante, à une distance de quatre fois leur hauteur.
- La vitesse d'accumulation du sable par des barrières n'est pas constante et varie largement en fonction de l'emplacement, de la saison, et de l'année. A un endroit où se déplacent des quantités de sable appréciables, une barrière simple de 1,2 m de hauteur se remplit habituellement en un an.
- La capacité de piégeage d'une barrière initiale ou supplémentaire de 1,2 m de hauteur est de l'ordre de 5 à 8 par mètre de longueur.

Les dunes construites à l'aide de barrières doivent être stabilisées avec de la végétation sous peine de voir les barrières se détériorer et libérer le sable. La construction de dunes avec des barrières seulement ne constitue que la première étape d'une opération dont la seconde étape doit comporter la mise en place de la végétation.

V.2.4.4 Avantages et inconvénients:

Par rapport aux procédés classiques, les écrans géosynthétiques présentent les avantages et les inconvénients suivants:

* Avantages:
  - Facilité de transport et mise en œuvre
  - Coût modéré,
  - Efficacité.

*Inconvénients:
  - Intégration paysagère discutable.
  - Technique de pose et mode d'implantation restant à préciser et/ou améliorer (installation verticale ou perpendiculaire au sol, implantation en courbes de niveau ou casiers...),
  - La nécessité d'un suivi méthodologique (interventions répétées).

V.3 MONTAGNE

L'érosion du manteau neigeux liée au transport de la neige par le vent et son accumulation perturbent le fonctionnement du réseau routier, dans un contexte de plateau où le relief est peu marqué : absence de visibilité et apparition de congères sur certaines particularités du relief.

Les mécanismes des modes de transport de la neige par le vent sont très similaires à ceux du transport des particules de sol comme les poussières et le sable. Il s'agit de la reptation, de la saltation et de la diffusion turbulente. Ces phénomènes sont étudiés dans des laboratoires comme le CEMAGREF de Grenoble, le Centre d'Etude de la Neige ou des universités.

L'amélioration de la protection contre les risques passe par la maîtrise de ce phénomène à l'aide de techniques éprouvées comme les barrières à neige. Les barrières à neiges sont en bois ou en filets ou grilles synthétiques, érigées à quelque distance de la zone à protéger des congères ; l'action de la barrière est d'amasser la neige du côté sous le vent.

V.3.1 Protection végétale (VEG)

Il s'agit de la mise en place d'une végétation adaptée de type haie.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	+	++	0	0	0

L'espacement des arbustes est choisi de manière à obtenir une porosité de 50%. On disposera de 2 à 3 rangées. Ceci afin d'éviter les trouées liées à la mort d'un arbre et génératrices de couloir à congères. Les passages se feront par des trouées disposées en quinconce.
Bien sûr, ces haies doivent être taillées et de préférence de hauteur inférieure à 2 mètres pour respecter les conditions de distance par rapport aux riverains.

V.3.2 Système de Confinement Géoalvéolaire par brise-vent (CGAbv)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	0	0	0	+	++	0	0	0

V.3.2.1 Conditions de stabilité

Les dispositions à prendre sont très proches du V.2.4.1

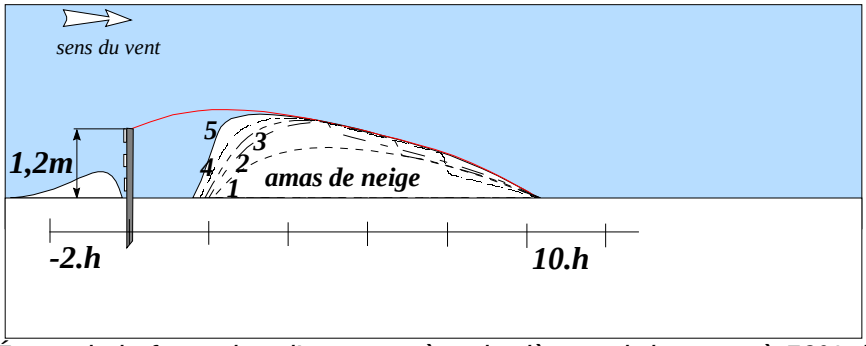


Fig. V-7 Étape de la formation d'une congère derrière un brise-vent à 50% de porosité

Ces barrières à claire-voie, généralement haute de un à trois mètres, sont érigées à une distance d'environ 15 m d'un chemin de fer ou d'une route pour les protéger de la neige (figure V-7).
L'espacement entre poteaux est d'environ 1,50 m. Ils sont disposés de part et d'autre de la barrière.

V.3.2.2 Conditions de mise en œuvre.

Les poteaux métalliques sont mis en place sans difficulté manuellement.

V.3.2.3 Conditions d'entretien.

On veillera lors de l'installation à placer les poteaux de manière à ce qu'ils soient sollicités le moins possible lors de la fonte de la neige.

VI ÉROSIONS ANTHROPIQUE ET ANIMALE

VI.1 CONTEXTE DE L'EMPLOI DES GÉOSYNTHÉTIQUES

Les érosions anthropique et animale intéressent différents types d'ouvrages :

- ➔ les sites sensibles : parcs naturels, littoral…,
- ➔ les talus d'ouvrages.

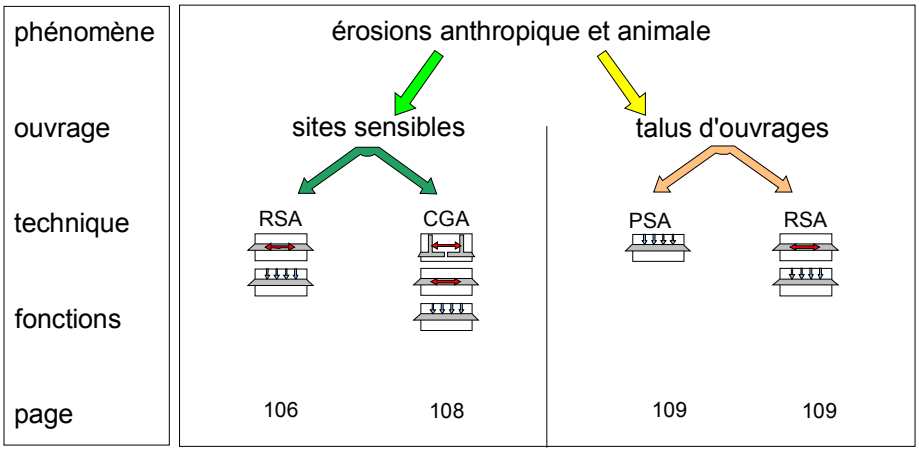


Fig. VI-1 Organigramme de choix

Les sites naturels : dunes, parcs… et touristiques : pistes de ski, terrains de sports…, sont souvent victimes de l'engouement qu'ils suscitent auprès du public. La végétation, foulée au pied, écrasée ou arrachée par les sabots ou les pneumatiques, disparaît laissant le terrain sans protection. Celui-ci s'érode sous l'action des passages et de la pluie. D'autres chemins sont alors préférés jusqu'à ce qu'ils subissent le même sort.
Les talus d'ouvrages : routiers ferroviaires… à l'abri de la présence des prédateurs et humaine sont des sites où les animaux appelés fouisseurs tels les lapins, les rats… pullulent et minent le terrain.

Les Géosynthétiques peuvent être employés dans la protection de ces sites contre les destructions liées aux passages répétés ou à l'action volontairement destructrice (vandalisme ou nourriture) faite par l'homme ou les animaux.

VI.2 ACCÈS AUX SITES SENSIBLES

Les sites sensibles sont principalement les zones supportant un fort flux touristique. Il s'agit des chemins et accès aux plages, aux sites montagneux, aux parcs naturels. L'érosion est due à la destruction de la végétalisation qui est foulée, arrachée, ce qui fragilise la couche supérieure de sol. Une alternative aux platelages peuvent être les pistes renforcées par des géosynthétiques ou des structures alvéolaires rigides.
Il peut s'agir également dans certains cas de protéger les talus des chemins par géogrilles pour limiter les chutes de pierres ou érosions dues aux passages « hors pistes».

VI.2.1 Nattes de renforcement du sol d'apport (RSA)

La création de chemins viabilisés permet de canaliser la circulation des personnes et des véhicules et de préserver le site et sa flore. Cette protection des accès piétons/véhicule aux sites est réalisée à l'aide de géogrilles ou de géocomposites. En plus de la protection des dunes ou de surfaces végétalisées contre le passage des piétons, ces techniques permettent d'assurer la carrossabilité

pour les véhicules d'urgence (figure VI-2).
On notera que ces techniques existent en version plus résistantes (militarisées) pour, par exemple, favoriser le passage de véhicule blindés ou tous terrains sur sol mou ou sable ainsi que l'atterrissage d'hélicoptères ou d'avion de transport ou de combat. L'unique différence réside dans la capacité de créer un effet de dalle et une résistance à la traction élevée.

Fig. VI-2 Protection d'une plage.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	0	+++	0	+	++	0	++	0	0

VI.2.1.1 Conditions de stabilité

***Influence sur le sol :**
La géogrille assure le renforcement de la piste et limite l'orniérage. Sur un sol ayant une bonne portance comme les plages en sable, la géogrille apporte une cohésion de surface par effet membrane. Sur un sol plutôt mou, la structure doit être plus rigide, ce qui peut être effectué soit par des inclusions plastiques ou métalliques. Il n'existe pas de méthode de dimensionnement fiable à l'heure actuelle. L'idée est de diminuer la pression transmise au sol à une valeur inférieure à la résistance à la compression à court terme du sol.
***Caractéristiques en liaison avec la géométrie :**
La géogrille est positionnée dans le sens de la meilleure résistance à la traction.

VI.2.1.2 Conditions de mise en œuvre

***Planéité du support :**
Demande un réglage fin, arrachement éventuel d'arbustes pour améliorer la planimétrie.
***Facilité de mise en œuvre :**
La structure ne nécessite pas d'apport de matériau extérieur, ni de moyens spécifiques de mise en œuvre. Toutefois, dans le cas d'accès aux plages, un remplissage en sable sur quelques centimètres peut être effectué.
***Fixation du support** :
Elle est réalisée par fiches métal ou plastiques aux coins de la piste. Attention à la fixation lorsque l'on est sur une pente.
***Ensemencement** :
possible.

VI.2.1.3 Conditions relatives à l'entretien

***Irrigation arrosage**
Non applicable.
***Durabilité**
Attention à celle des polyamides et des polyesters.
***Comportement au feu**
Non applicable.

VI.2.1.4 Fonctions spécifiées

Bonne, dépose éventuelle en fin de saison pour éviter un ensablement trop important.

VI.2.2 Systèmes de confinement géoalvéolaire (CGA)

Le système de confinement géoalvéolaire est constitué de cellules rigides permettant d'obtenir un effet de dalle (figure VI-3). Ce qui lui permet de supporter des surcharges routières de type véhicules légers si la plateforme le permet.

Les cellules ne sont pas remplies entièrement afin que la végétation puisse croître dans les alvéoles sans être écrasée par les pneumatiques.

Ces structures trouvent leur place aussi dans les sites de loisirs : pistes de ski, talus ou abords de terrains sportifs, terrains militaires.

Fig. VI-3 Protection d'un chemin.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	+++	0	++	0	++	++	0	+	0	0

VI.2.2.1 Conditions de stabilité

***Caractéristiques en liaison avec la géométrie :** l'ouverture des alvéoles doit être supérieure au diamètre de la surface d'application de la charge ou être protégée par une structure bidimensionnelle. La plateforme recevant ce système doit pouvoir supporter les charges envisagées.

VI.2.2.2 Conditions de mise en œuvre

* **facilité de mise en œuvre** :

La structure est facile à mettre en œuvre car elle ne nécessite pas de moyens spécifiques. Elle se présente couramment sous la forme de dalles qui peuvent se connecter entre elles.

***Planéité du support :**

Un réglage précis est demandé lorsque que le système est destiné à supporter une circulation de véhicules.

* **apport de matériau extérieur**

La structure est remplie par apport de matériau extérieur.

***Fixation du support par fiches métal ou plastiques :** Non

* **ensemencement**

La CGA peut être végétalisée par ensemencement. Dans ce cas, les cellules ne doivent pas être remplies complètement.

VI.2.2.3 Conditions relatives à l'entretien

***Irrigation arrosage**

Dans le cas d'une végétalisation, oui.

***Durabilité**

Non applicable.

***Comportement au feu**

Non applicable.

VI.2.2.4 Fonctions spécifiées

Bonne, dépose éventuelle pour travaux.

VI.3 TALUS D'OUVRAGES ET REMBLAI

L'érosion des talus d'ouvrages et des remblais peut être due soit aux rongeurs qui y creusent leurs terriers, soit involontairement par les engins d'entretien qui lors du fauchage, par exemple, entament la surface du sol (figure VI-4).

Cette érosion affaiblit les talus routiers, aéroportuaires et ferroviaires, les digues et barrages ainsi que les couvertures de centres de stockages de déchets. La stabilité de peau est alors affaiblie lors du changement des conditions hydriques et des glissements plans peuvent s'initier (figure VI-5).

Dans certains ouvrages de type berges ou digues, les galeries des terriers peuvent également être des amorces à un phénomène de renard hydraulique.

Fig. VI-4 Erosion d'une berge

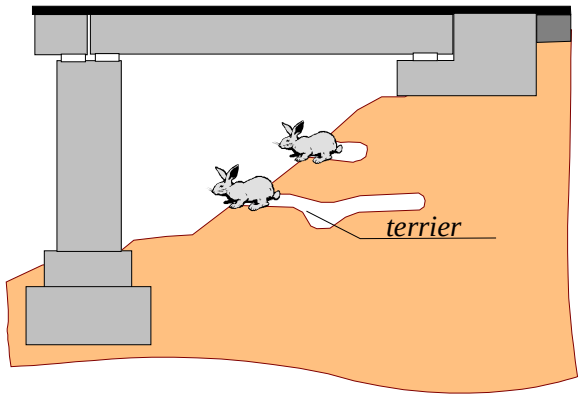


Fig. VI-5 Erosion d'une culée

VI.3.1 Géosynthétiques de protection du sol d'apport (PSA)

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	++	++	0	++	+++	0	0	0	0

VI.3.1.1 Conditions de stabilité

Le produit sera dimensionné en fonction des espèces susceptibles de s'établir dans l'ouvrage. Un contact avec un spécialiste de la faune peut s'avérer fructueux.

***Influence sur le sol**

Ces techniques ne sont pas destinée à renforcer le sol. Toutefois, certains produits géosynthétiques peuvent par leur nature remplir la fonction de lutte contre l'érosion animale en intégrant par exemple des éléments métalliques.

***Caractéristiques en liaison avec la géométrie**

La taille des mailles doit être suffisamment petite pour limiter l'intrusion animale dans l'ouvrage quel que soit l'âge de l'animal.

***Comportement au feu**

Non applicable.

VI.3.1.2 Conditions de mise en œuvre

Planéité du support
Fixation du support
Facilité de mise en œuvre

VI.3.1.3 Conditions relatives à l'entretien

Généralement les géosynthétiques ne présentent aucun aspect nutritif pour les animaux. Le rongeur va chercher à détruire localement la protection pour établir son terrier mais pas dans le but de se nourrir.

VI.3.2 Nattes de renforcement du sol d'apport (RSA)

Cette application est identique à la précédente à part le fait que le dispositif peut avoir une fonction de renforcement du sol d'apport.

Fonction	Confinement	Renforcement			Protection			Séparation	Filtre	Drainage
		micro	meso	macro	micro	meso	macro			
Pertinence	0	++	+++	0	++	++	0	0	0	0

VII BIBLIOGRAPHIE

VII.1 Publications

Antoine F. Richard F. (1993) Expérimentation de tunages géotextiles en défense de berges, Note STC.VN-A, 2 pages

Bagnold R.A. (1941), The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London, 1941

Baize D., (1988) Guide des analyses courantes en pédologie. INRA Editions, Paris, 172 p.

Bessemoulin J., (1969), Atlas climatique de la France, Ed. Météorologie Nationale, 45 planches

BRGM, (1976), Carte géologique de la France 1/100000, 2 planches

CCR, (1999), Les catastrophes naturelles en France, plaquette, 22 pages

Courtin T. Thibault J. (1988) Utilisation de gabions géotextiles dans la réalisation de défense de berges économiques – expérimentations de 1986 à 1988, Note d'information STC.VN-A, 2 pages

DPNM (199?), L'érosion de nos côtes, Quel aménagement ? Quelle défense du littoral ? METL 20 pages

Fagon Y. Fouilliarrt V. Richard F. Gourvat D. (1997) Expérimentation de défenses de berges par procédés géosynthétiques, Rencontres 97, Reims, pp.84-90

Fagon Y. (1999) Protection des Berges de voies navigables par procédés géosynthétiques : bilan de réalisations courantes et expérimentales, Rencontres 99, volume 1, pp.1-12

Gray D. H. Leiser A.T. (1989) Biotechical slope protection and erosion control, Krieger publishing company, 271 pages

Guiton M. (1998) Ruissellement et risque majeur, Phénomènes, exemples et gestion spatiale des crues, Etudes et recherches des LPC Série Environnement et Génie Urbain EG13, 315 pages

Henensal P. (1986) L'érosion externe des sols par l'eau, Approche quantitative et mécanismes, Rapport de recherche LPC N°138, 70 pages

Henensal P. Duchatel F. (1990) L'érodimètre à jets mobiles BLPC 167 pp. 47-53

Henensal P. (1993) Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes, Etudes et recherches des LPC, Série Géotechnique GT54, 111 pages

Henensal P., Rampon A. (1994) Etude de l'érodabilité des sols fins, Erosion et géotechnique, Rapport interne, CEMAGREF LCPC, 99 pages

Hudson N. (1981) Soil conservation, Batsford Academic and Education Ltd, 324 pages

IFEN (1998) Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France, Collection étude et travaux N°18, 63 pages et 1 CD

INRA, (1999), carte pédologique de la France

Koerner, R.M. (1990) Designing with Geosynthetics. Prentice-Hall, 761 pages ; ISBN: 0137261756

LCPC (1989) Les enrochements, 106 pages

LCPC, SETRA, (1986), Météorologie et Terrassement, 43 pages

LCPC, SETRA, (1992), Guide pour les Terrassements Routiers. Vol 1 et 2, 98 pages

LCPC, SETRA, (1994), Etanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier. Vol 1 et 2, 95 et 69 pages

Legret M. (2001) Pollution et impact d'eaux de ruissellement de chaussées, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Route CR27, 109 pages

METL, DGTI, DR, (1980) Fondations de ponts en site aquatique en état précaire, Eds LCPC, SETRA, 162 pages

METL, SETRA, Ministère de l'Environnement, (1994) La gestion extensive des dépendance vertes routières, Eds Ministère de l'Environnement, 119 pages

Neboit R. (1991) L'homme et l'érosion, PU Blaise Pascal, 150 pages

PIANC AIPCN, (1987) Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways, supplement du bulletin 57, pp.13-82
Pihan J. (1978) Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France, Colloque sur l'érosion agricole, Ed. H. et T. Vogt, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, pp. 13-16
Pilarczyk, K. W. and Breteler, M. K., (1994), "Designing of Revetments Incorporating Geotextiles", Proc. 5th IGS Conf., Singapore, pp.733-738.
Pilarczyk, K.W.: (2000) Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering , Balkema, 936 pages., ISBN : 90 5809 302 6
Pomerol, C., Lagabrielle, Y. et Renard, M. (2000). Eléments de géologie. Dunod. Paris, 746p.
Pouquet, J. (1961). L'érosion des sols. Presses universitaires de France. Paris, 126p.
Puig J. Schaeffner M. (1986) Fonctionnement et règles d'emploi d'un géotextile tridimensionnel utilisé pour la lutte contre l'érosion pluviale, 3rd International Conférence on Geotextiles, Vienne, Autriche, pp. 477-482
Roose E. (1994) Introduction à la gestion conservatoirede l'eau, de la biomass et de la fertilité des sols (GCES) Bulletin pédologique de la FAO N° 70, 350 pages
US Army (1995) Engineering use of geotextiles, TM 5-881-8/AFJMAN 32-1030, 58 pages
Warlouzel K. (1999) Caractérisation et comportement des géotextiles pour la lutte contre l'érosion pluviale des sols : étude des mécanismes de protection et compatibilité avec la végétation, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I, 210 pages
Wishmeier W.H., Smith D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning U.S. Department of agriculture, Handbook n°537, 58 pages

VII.2 Normes

NF G 38 019 - Géotextiles - Détermination de la résistance au poinçonnement

Normes d'essais
NF EN 918 Essai de perforation dynamique (Essai de chute d'un cône)
NF EN 963 Echantillonnage- Prélèvement d'éprouvette
NF EN 964-1 Détermination de l'épaisseur
NF EN 965 Détermination de la masse surfacique
NF EN ISO 10318 Géosynthétiques – Géotextiles , produits apparentés aux géotextiles, géomembranes et produits apparentés aux géomembranes – Termes et définitions.
NF EN ISO 10319 Essai de traction sur bande large
NF EN ISO 10320 Identification sur site
NF EN ISO 10321 Essai de traction sur joint/Couture par la méthode de la bande large
NF EN ISO 9863-2 Détermination de l'épaisseur à des pression prescrites. Méthode de détermination de l'épaisseur des couches individuelles de produits multicouches.
NF EN ISO 11058 Détermination des caractéristiques de perméabilité à l'eau normalement au plan, sans contrainte mécanique
NF EN ISO 12235 Essai de poinconnement statique
NF EN ISO 12956 Détermination de l'ouverture de filtration caractéristique
NF EN ISO 12958 Détermination de la capacité de débit dans le plan
NF EN ISO 13427 Simulation de l'endommagement par abrasion (essai du bloc glissant)
NF EN ISO 13437 Méthode pour l'installation et l'extraction d'échantillons dans le sol et pour la réalisation d'essais en laboratoire sur les éprouvettes.
XP ENV 1897 Détermination des propriétés de fluage en compression.
XP ENV ISO 10772-1 Mode opératoire de simulation des dégâts lors de l'installation. Installation dans les matériaux granulaires.

Et autres normes d'application

Et autres publications du CFG :
- guides techniques
- actes des rencontres

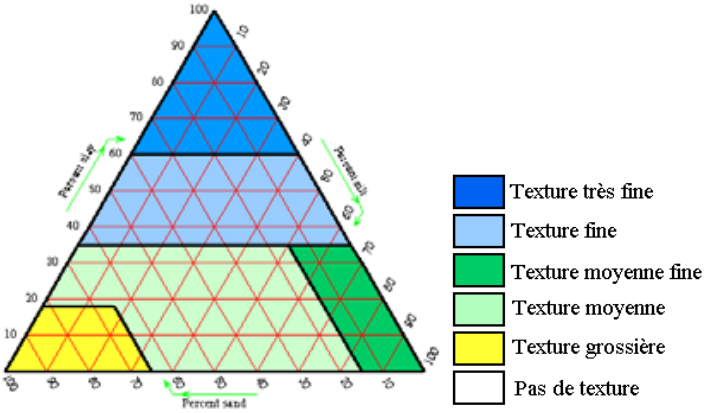
VIII INDEX

	Mot	*Page*	*Définition*
A	activité	15	il s'agit du rapport de l'indice de plasticité à la fraction argileuse totale du sol, c'est-à-dire au pourcentage pondéral de particules inférieures à 2 microns.
	aléa	14, 22	Phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données. (crue, affaissement de terrain, projection volcanique...)
	anthropique	6, 7, 13, 14, 30, 33, 76, 91, 97	D'origine humaine
B	backwash	73	voir ressac
	batillage	10, 18, 19, 25, 28, 33, 66	battement de l'eau sur les berges dû au déplacement des bateaux de fret ou à la pratique des sports nautiques motorisés ou au clapot
	bathymétrie	19, 70, 102	La science de la mesure des profondeurs de l'océan pour déterminer la topographie du sol de la mer
	Beaufort	19, 22	Degrés d'une échelle progressive (l'échelle Beaufort) correspondant à des effets du vent. Cette gradation très approximative est en usage dans la marine et permet d'estimer la vitesse du vent sans instrument de mesure.
C	carrossabilité	54, 90	Capacité à permettre le passage de véhicules par apport de résistance de surface
	catastrophe naturelle	6, 22, 23	Phénomène ou conjonction de phénomènes dont les effets sont particulièrement dommageables.
	coco	28, 47, 68	produits à base de fibre de noix de coco utilisés dans la culture et les travaux publics
	confinement	26, 30, 33, 44, 57, 58, 60, 76, 79	Action d'envelopper et maintenir dans un volume déterminé un sol ou un matériau en le contenant dans une structure géosynthétique. Cela peut consister à contenir le matériau complètement ou partiellement.
	conteneur	21	Géosynthétique qui remplit la fonction de contenir
	cours d'eau	20, 22, 56, 58, 60, 68, 70	terme général désignant tous les chenaux superficiels ou souterrains, naturels, conducteurs d'eau permanente ou temporaire.
D	danger	22, 76	État qui correspond aux préjudices potentiels d'un phénomène naturel sur les personnes.
	dissipative, diffraction	19	sur les obstacles, les vagues sont amorties à l'arrière par un jeu de diffraction, la houle change de direction car elle doit contourner l'obstacle. Cela entraîne une perte d'énergie en arrière de cet obstacle.
E	échelle	13, 14, 24	
	enjeux	6, 75	Personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel.
	érodimètre	15, 103	appareils permettant de produire une érosion artificielle pour quantifier de manière reproductible et réaliste l'érodibilité d'un sol. Ils peuvent se ranger en deux catégories : les plus connus qui sont les appareils de type gravitaire (simulateurs de pluie) et les appareils de type rotatif (à tambour ou semblable à une cellule triaxiale par exemple).

	Mot	*Page*	*Définition*
	érosion	Trop nombreux	déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou d'une roche sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur, hygrométrie, gel, dessiccation...).
	érosivité	18, 31	L'érosivité des pluies est une quantification de l'agressivité de celle-ci.
	espace de liberté (d'un cours d'eau)	20	Espace du lit majeur d'une rivière à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales permettant une mobilisation des sédiments ainsi qu'un fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres. La notion d'"espace de liberté" est au départ liée aux problèmes de l'érosion des berges et de leur protection systématique dans le cadre de la gestion des cours d'eau.
	estran	11, 22, 73, 74, 76, 78, 80, 81, 84, 103	C'est la zone alternativement couverte et découverte par la mer.
	évapotranspiration	18, 39, 40, 43	**(méthode de Penman)** Ensemble des phénomènes et des flux d'évaporation physique et de transpiration biologique, notamment de la végétation, qui interviennent dans le bilan d'eau d'un territoire, d'un hydrosystème terrestre, comme facteur de flux sortant. Elle est exprimée le plus généralement en hauteur moyenne évaporée sur la surface considérée pendant une durée définie. En 1944, Penman combine un bilan énergétique à une approche aérodynamique. La méthode de Penman élimine la nécessité de devoir mesurer la température de surface de l'eau ; seule la température de l'air est requise. L'équation qui en résulte est la suivante : $E = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}.E_r + \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}.E_a$ avec $E_r = \frac{R_n}{l_v.\rho_v}$ et $E_a = K(u).(e_s - e)$ et Δ - pente de la courbe pression de vapeur saturante - température $\Delta = (4098.e_a)/(237{,}3 + T)^2$ kPa γ - constante psychrométrique (kPa.°C^{-1}) γ = 0,0016286 * *(P/λ)* où *P* est la pression atmosphérique λ - chaleur latente de vaporisation λ = 2,501-0,002361.T_s (MJ kg^{-1}) R_n - est le rayonnement net (l'unité est W/m^2), l_v - est la chaleur latente de vaporisation (J/kg), ρ_w - est la densité de l'eau (kg/m^3), *K(u)* - est le coefficient de transfert massique, e_s - est la pression de vapeur saturante à la température de l'air et *e* - est l'actuelle pression de vapeur. L'équation de Penman est une moyenne pondérée du taux d'évaporation du au rayonnement net (*Er*) et au transfert de masse turbulent (*Ea*).
F	fonction	Trop nombreux	Rôle d'un élément dans un ensemble
G	gabion	10, 58, 59, 60, 62, 63, 69, 71, 78, 81, 82, 96	A l'origine, terme militaire désignant un grand panier sans fond, rempli de terre, servant de protection dans la guerre de siège, aujourd'hui, grand panier rempli de cailloux pour la construtions d'ouvrage de génie civil
	géosynthétiques	Trop nombreux	techniques issues de la collaboration de l'industrie chimique et textile avec le métier des travaux publics et comportant les produits : Géotextiles, Géomembranes et produits apparentés
	halophyte	69	Qui aime l'eau, pour les plantes par exemple roseaux

	Mot	*Page*	*Définition*
H	halophyte	69	Qui aime l'eau, pour les plantes par exemple roseaux
H	hydroseeding	39, 40, 42,	ensemencement par voie humide
J	jet de rive	16, 21, 74	Déferlement de l'eau sur l'estran
	jute	Trop nombreux	Jute est le nom commun des plantes du genre Corchorus, plantes tropicales annuelles de la famille des Tiliaceae. Plusieurs espèces du genre peuvent être exploitées pour produire de la fibre de jute, mais les deux espèces principalement cultivées à cet effet sont Corchorus capsularis et Corchorusolitorius.
K			
L	Lit	15, 69, 71	Le lit est la partie en général la plus profonde de la vallée dans laquelle s'écoule gravitairement un courant d'eau. De manière classique, on distingue le lit mineur limité par des berges, du lit majeur occupé temporairement par les eaux débordantes. Partie dans laquelle se déplacent, en dehors des crues, l'eau et les matériaux transportés
	Lit majeur	98	Lit occupé en permanence, délimité par des berges
	Lit mineur	99	Partie adjacente au chenal, inondé en cas de crue
M	macro	13, 31, 38	Métrique ou échelle de l'ouvrage
	marnage	10, 20, 21, 28, 34	Le marnage exprime la différence de niveau de la mer entre une basse mer et une pleine mer consécutives
	mat	29	matelas, matelas à petites mailles
	mesh	50	maille, matelas de fibres assemblées aléatoirement
	meso	13, 31, 38	Décimétrique ou échelle de la couche d'apport
	micro	13, 31, 38	Millimétrique ou particule
	mulch	40	Tout matériau; paille, sciures de bois, feuilles, pellicules de plastique ou sol meuble, épandu à la surface du sol afin de le protéger ainsi que les racines des plantes, contre les effets des gouttes de pluie, contre la formation de croûtes, le gel et l'évaporation.
N	nattes	Trop nombreux	Nom générique pour définir les géomatelas et géofilets tels que définis dans la norme NF CEN ISO 10318. Il s'agit de structures planes ou tridimensionnelles perméables constitués de filaments fibres et/ou d'autres éléments synthétiques ou naturels pérennes ou biodégradables utilisés plus particulièrement pour maintenir ou protéger les particules ou la couche de sol d'apport.
	net	52	filet, il s'agit d'un matelat à maille large
	nœud	22	L'unité de vitesse en navigation maritime (et aérienne) est le noeud. Une vitesse moyenne de 1 noeud correspond à un parcours de 1 mille marin en 1 heure, soit 1 852 m en 1 heure. Ainsi : 1 noeud = 1,852 km/h.
O			
	pF		Logarithme décimal de la charge capillaire exprimée en centimètres
	pH	14, 66	Le potentiel hydrogène est le logarithme décimal de la concentration d'ions [H_3O^+]. Le pH sert à mesurer l'acidité de l'eau. Il peut varier de valeurs de 1 à 14; 7 correspondant à la neutralité.
	pluviométrie	103, 104, 105	
	pédologie	13	Science qui étudie les caractères physiques, chimique et biologique des sols de surface

	Mot	*Page*	*Définition*
	PPR	14	La loi du 2 février 1995 a créé les plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) . Leur objet est de cartographier les zones soumises aux risques naturels et d'y définir les règles d'urbanisme, de construction et de gestion qui s'appliqueront au bâti existant et futur. Ils permettent également de définir des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à prendre par les particuliers et les collectivités. Ils s'imposent aux plans d'occupation des sols (POS) et donc à la délivrance des permis de construire par les maires.
Q			
R	ravine	9, 18, 27, 45, 69	Creux de profondeur décimétrique dû à l'érosion
	reflective, reflexion	19	la réflexion des vagues sur des obstacles entraîne le creusement en avant de l'obstacle, de la plage ou de la plate-forme rocheuse et les vagues sont d'autant plus réfléchies par un obstacle, qu'il est vertical et peu rugueux. Sur des obstacles tels que des falaises plongeants, la réflexion permet au contraire une dissipation de l'énergie de la houle par formation de clapotis en avant de l'obstacle.
	ressac	19, 20, 74, 85	Il s'agit du courant de retour dû au retrait de l'eau du jet de rive
	rip rap		Enrochement
	rip current	16	voir ressac
	risque	Trop nombreux	Selon la terminologie des PPR, résultat de la combinaison des aléas et des enjeux
S	SIG	14	Un logiciel de type S.I.G. (Système d'Information Géographique) permet de faire de la cartographie de type vectorielle et bitmap (raster). Cette cartographie est en relation avec une base de donnée. Les logiciel utilisé support de cette technologie disposent d'un macrolangage qui les rend souple et permet de les adapter à des besoins spécifiques.
	sisal	28, 46	fibres végétales issues d'un cactus subtropical, l'agave
	substratum	59	Roche en place plus ou moins masquée par des dépôts superficiels
	substrat	7, 13, 14, 17, 19, 22, 39, 40, 59	Qui sert de base : voir substratum
	swash	74, 85	Voir jet de rive
T	taux de couverture	8, 12, 54, 67, 86	Pourcentage de recouvrement de la surfece du sol
	texture	12, 14, 15, 41, 104, 105	La texture correspond à des classes granulométriques indiquant les proportions en sable, limon et argile de l'horizon de surface. On utilise à cet effet le triangle de texture retenu est celui du GEPPA simplifié



	Mot	*Page*	*Définition*
	thalweg	69	Dépression ou fond de vallon : les courbes de niveau changent de direction sur les thalwegs en dessinant un "V" dont la pointe est dirigée vers l'AMONT et la concavité vers l'AVAL : elles s'emboîtent le long de l'axe du thalweg. Tout thalweg se jette dans un autre thalweg. L'ensemble des thalwegs d' un même bassin forme un arbre dont le tronc est le cours d'eau principal. On appelle cela un réseau dendritique.
U	U.V.	60, 62, 69, 84	Radiations invisibles à l'œil humain placées dans le spectre au-delà du violet, et dont la longueur d'onde est plus petite que celle du violet et plus grande que celle des rayons X mous.[11] Généralement, les matériaux à base de polymère reçoivent une charge de carbone ou d'antioxydant ou de stabilisant pour augmenter la durabilité. Se référer au guide sur la durabilité du CFGG. Des essais normalisés sont en cours d'élaboration.
V	vortex	21	tourbillon creux qui prend naissance dans un fluide en écoulement et dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du fluide
W			
X			
Y			
Z	ZNIEFF	13	Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique délimitées à partir de 1982 et devenu en 1992, par l'adoption d'une Directive sur « la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages » ou Directive « Habitats » du programme de la communauté européenne « Natura2000 » des « Zones de Protection Spéciale »
	zone de balancement des marées		Voir estran : zone intertidale ou estran

[11] (c) Larousse.

IX EXEMPLES DE SITES

Type de protection	*ouvrage*	*longueur*	*lieu*	*région*	*époque*
Erosion pluviale					
Natte de protection du sol d'apport	Talus RD	500m	Ambert	Puy de Dôme	1990
Voir Hénensal (1993)					
Erosion fluviale					
Protection tunage végétal	rivière	Brenne	Côte-d'Or		nov. 2001
Protection tunage	canal PG	50km	Corbigny	Nièvre	depuis 20 ans
Protection tunage	canal PG	200m	Aisne à la Marne		1991
Filtre sous couche de protection	canal GG	12m	Escaut	Nord	1995
Conteneur de couche de protection	canal GG	100m	Escaut	Nord	1995
Conteneur de couche de protection	canal GG		Jonage	Lyon	1995
Système de confinement géoalvéolaire	canal GG	12m	Escaut	Nord	1995
Natte de renforcement du sol d'apport	canal GG	12m	Escaut	Nord	1995
Géosynthétique de protection de la couche végétalisable	canal GG	12m	Escaut	Nord	1995
Filtre sous couche de protection	canal PG	30m	Escaut	Nord	1995
Système de confinement géoalvéolaire	canal PG	30m	Escaut	Nord	1995
Filtre à l'arrière de gabion géotextile	canal PG	60m		Centre	1986
Filtre à l'arrière de gabion géotextile	canal PG	10km	Belfort	Saone au Rhin	1988
Erosion littorale					
Epis et brises-lames	cote sableuse		Carnon	Hérault	
Epis et brises-lames	cote rocheuse		Ault	Somme	
Epis et brises-lames	cote sableuse		Agon-Coutainville	Manche	
Erosion éolienne					
Fascine sur dunes	dune		La Capte	presqu'île de Giens	1993
Alignement d'oyats	plage		Avranche	Manche	1984
Alignement d'oyats + fascines	plage		Boukogne sur mer	Nord	2001
Erosion anthropique					
Système de confinement géoalvéolaire	montagne		Plomb du Cantal	Puy de Dôme	1990
Système de confinement géoalvéolaire	montagne		Albertville	Savoie	1990
Natte de renforcement du sol d'apport			Houat, Quiberon	Morbihan	

RD : route départementale
PG : petit gabarit
GG : grand gabarit

X ANNEXES

X.1 Méthodologie d'expérimentations

Lorsque le maître d'œuvre hésite sur l'adaptation des techniques qu'il envisage de mettre en œuvre à son problème, il peut vouloir discriminer ces techniques à l'aide d'expérimentations. Sous le vocable expérimentations, nous regroupons le retour d'expérience sur un ou plusieurs ouvrages, des planches d'essais ou des planches test instrumentées et suivies comme présentées ci-dessous.

X.1.1 In situ

Les expérimentations in situ correspondent à des planches expérimentales ou parcelles réalisées sous pluies ou sous courants, sous houles naturels.
Les caractéristiques de l'essai sur site doivent permettre de répondre à deux objectifs :

- ➔ Le premier d'ordre technique est de fournir les paramètres de contrôle de l'essai de façon simple et fiable,
- ➔ Le second d'ordre économique est de pouvoir réaliser un essai pour un coût modeste.

Ces expérimentations comparent généralement une ou plusieurs techniques à une parcelle témoin.
Ce type d'expérimentation en place est l'essai qui donnera le résultat le plus fiable au prix toutefois d'un certain coût et d'un délai important.

X.1.1.1 Pente et talus

La parcelle doit être de taille adaptée à l'expérience, c'est-à-dire avoir une longueur de pente suffisamment importante (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) pour pouvoir apprécier l'impact des gouttes de pluie sur le sol et pour que se manifestent l'écoulement superficiel ou ruissellement et subsuperficiel ou hypodermique.
La parcelle n'est pas nécessairement délimitée latéralement mais doit l'être en longueur. Cela sera réalisé par une tranchée drainante, une bordure ou une gouttière.
Une gouttière placée sur le sol et éventuellement une autre gouttière positionnée à une profondeur déterminée dans une tranchée permettent de réceptionner le ruissellement superficiel et l'écoulement hypodermique ainsi que les charges solides.

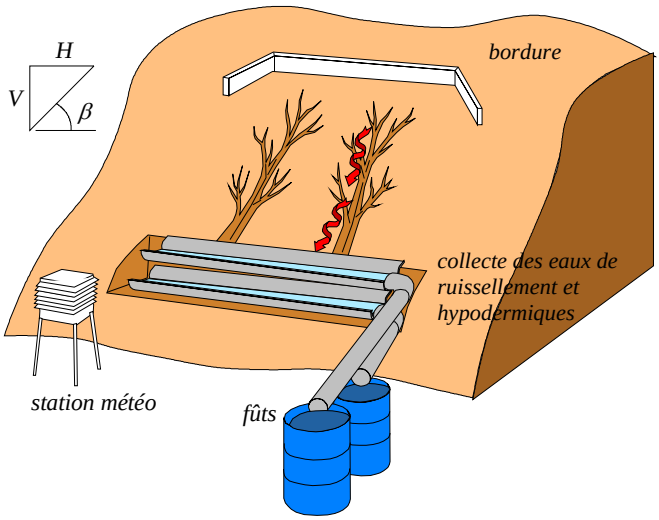


Fig. X-1 planche expérimentale

Des prélèvements peuvent être faits aux exutoires en parallèle aux mesures de pluviosité. Ces mesures nécessiteront l'implantation d'une petite station météorologique. Les mesures réalisées seront donc dans la mesure du possible :

- ➔ L'intensité du ruissellement,
- ➔ L'intensité de l'infiltration,
- ➔ La quantité de matière solide érodée et sa granulométrie par rapport à celle du sol existant,
- ➔ La pluviométrie,
- ➔ La température, l'hygrométrie, l'ensoleillement.

Avec une valeur mensuelle de la pluviométrie proche de 100 mm, le relevé peut être hebdomadaire ou mensuel. Le critère de réception de l'essai est souvent lié à des mesures de tenu de la technique, et de l'aspect visuel. Le suivi de la surface peut être réalisé par relevé topographique classique et photographies ou à l'aide de photogrammétrie faite à partir de photographies stéréo.

X.1.1.2 Berges et estrans

Dans le cas d'un essai sur berges ou estrans, la parcelle doit être également de taille suffisante pour intégrer l'effet du courant ainsi que du marnage ou de la marée (figure X-2). Des prélèvements peuvent être faits en parallèle aux mesures de bathymétrie. Le point le plus important est la limite de la planche où peuvent s'initier des érosions dans le cas des planches sur talus ou sur berge.

Fig. X-2 planche expérimentale

Le lecteur peut se référer aux expérimentations menées sur l'Escaut pendant plusieurs années par le CETMEF et VNF (Fagon et al., 1997 et 1999).

X.1.1.3 Dunes et sites sensibles

La réalisation d'essais in situ est encore le meilleur moyen de juger de la capacité de piégeage du matériau pour l'érosion éolienne ou de l'adaptation d'une technique au piétinement des touristes.

X.1.2 En laboratoire

X.1.2.1 Simulateurs de pluie et de ruissellement

Les planches réalisées en laboratoire permettent plus rapidement de réaliser des simulations de pluie ou ruissellement en conditions contrôlées. La planche dépasse rarement une surface de 1m², toutefois une longueur plus grande permet d'observer un écoulement hypodermique mieux établi. Le simulateur de pluie sera placé plusieurs mètres au-dessus de la planche. Ce simulateur doit fournir une pluie constituée de gouttes (figure X-3).

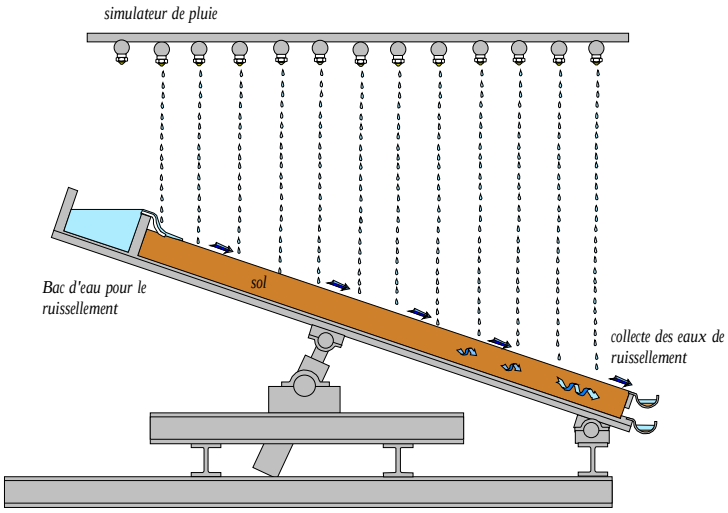


Fig. X-3 simulateur de pluie (Warlouzel, 1999)

Le laboratoire permet plus facilement d'appliquer des critères d'acceptation qualitatifs. Il est plus facile de recueillir les eaux de ruissellement dans un réceptacle totalisateur et de mesurer le volume solide érodé. Les mêmes mesures qu'in situ sont effectuées à l'aide de débitmètres et de fûts :

- pluviométrie,
- ruissellement,
- matière solide érodée.

Toutefois, ces essais sont critiquables sur plusieurs points :

- La distribution temporelle variable est remplacée par une pluie constante,
- La pluie est monogranulaire alors que la pluie est naturellement étalée,
- Les dispositifs de contrôle de l'érosion végétalisés ne permettent pas d'intégrer les saisons,
- Les essais sur bancs ne permettent pas de valider les recommandations de mise en œuvre.

Ces appareils existent au CEMAGREF et à l'université de Grenoble au LIRIGM.

X.1.2.2 Canal à houle

Réalisés dans des canaux à houles, les essais en laboratoire de dispositifs de défense de berge ou de côtes ont les mêmes avantages et inconvénients que les essais de pluie en laboratoire.
L'avantage majeur est la possibilité d'instrumenter entièrement l'ouvrage et de maîtriser l'énergie de la houle. On peut avoir une idée fiable de l'effet de la protection. Toutefois la géométrie du modèle d'ouvrage est souvent réduite.

Finalement, on retiendra que les problèmes de similitude ne sont pas simples à régler (granulométrie ou texture du matériau modèle, rhéologie du sol en phase solide ou visqueuse, influence de la gravité). Il semble possible d'étudier sur modèles réduits physiques l'érosion en grande masse de

côtes sableuses, mais il semble ardu de reproduire le phénomène d'érosion de côte dont la structure du sol ou texture est plus complexe.

X.1.2.3 Soufflerie

L'étude de l'érosion éolienne en soufflerie souffre des mêmes remarques que le canal à houle. Au delà de l'étude théorique de la dynamique des fluides autour d'un obstacle, ces techniques, au regard de leur coût, sont d'un soutien faible pour des cas particuliers. Ce type d'appareillage existe au CEMAGREF de Grenoble.

X.1.2.4 Caractérisation de l'érodabilité des sols

Des travaux menés au LCPC dans les années 90, par Hénensal, pour corréler l'érodabilité des sols en fonction de paramètres plus quantitatifs tels que la valeur au bleu, la texture et la pente, ont conduit au développement d'un appareil spécifique (Hénensal et al., 1990) de type rotatif.

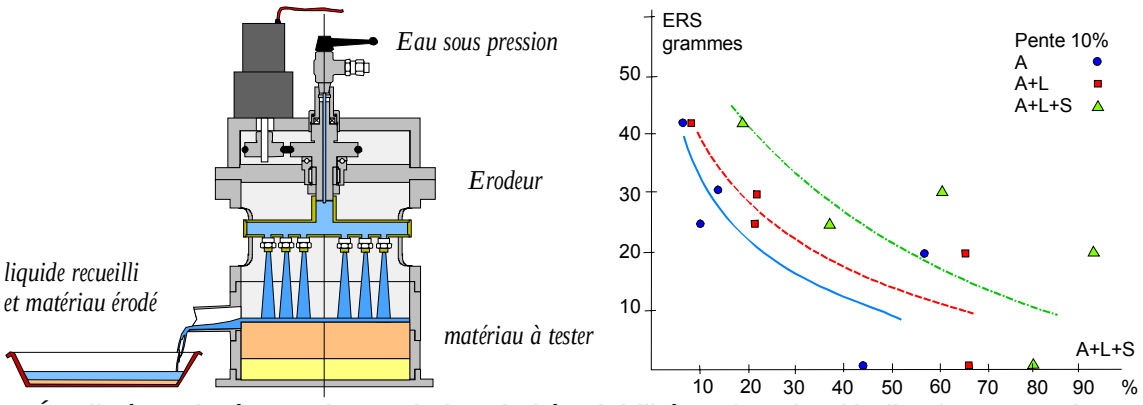


Fig. X-4 Érodimètre d'Hénensal et variation de l'érodabilité en fonction l'indice la texture (Henensal et al., 1994)

Les résultats permettent de relier dans des conditions d'essai conventionnelles réalisables en laboratoire ou sur chantier, l'érodabilité d'un sol à des paramètres familiers au monde des travaux publics : limites d'Atterberg, paramètres de la GTR. Ces travaux ont montré des perspectives intéressantes mais n'ont pas à l'heure actuelle abouti (figure X-4).

X.1.3 Analyse des résultats

Lors de l'analyse des résultats de ces essais, on ne s'appesantira pas sur la variation de l'érosion avec la pluviométrie, mais on s'intéressera aux valeurs de matière érodée, à la variation de la granulométrie et du comportement du complexe.
D'un point de vue pratique, on cherchera le dispositif de lutte contre l'érosion qui restera intègre, sauf s'il a vocation à disparaître (biodégradabilité) et qui conservera au maximum la texture du sol (courbe granulométrique homothétique).

X.2 Stabilité des ouvrages

Cette annexe a pour objectif de présenter rapidement l'état des connaissances actuelles sur les méthodes de dimensionnement et va s'inscrire dans la réglementation afin de répondre aux exigences de l'entreprise.
Bien que le caractère tridimensionnel des ouvrages ne soit pas totalement négligeable, les modèles adoptés sont bidimensionnels avec une hypothèse de déformations planes. Ce choix procède aussi et surtout de la démarche méthodologique adoptée, qui consiste à progresser du modèle le plus simple au plus complexe.

X.2.1 Définition des chargements

Généralement, les seules charges autres que le poids propre apparaissent dans le cas des protections de berge et littorales. Une vérification locale pour une protection donnée ne pourra être effectuée par le concepteur sans avoir une vision plus globale du choix de sa solution dans un environnement hydraulique sensible.

X.2.2 Définition des états limites

Nous allons exposer brièvement la théorie des états limites couplée à l'approche semi-probabiliste de la sécurité. A l'instigation de Terzaghi, une attention particulière a été portée sur les deux principaux groupes de problèmes de la géotechnique, à savoir les problèmes de stabilité et de déformations. Il a indiqué que les premiers ne considèrent que les conditions précédant immédiatement la rupture ultime par écoulement plastique imminent (ce que nous appelons états limites ultimes ELU), alors que les seconds considèrent les déformations du sol dues aux charges qui lui sont appliquées (états limites de service ELS). Le principe des facteurs de sécurité partiels a ensuite été introduit dans la théorie du calcul des états limites. Il s'agit d'appliquer ces facteurs aux différents types de charges et aux caractéristiques de cisaillement du sol.
Cette approche semi-probabiliste a pour but de rendre compte des incertitudes de paramètres intervenant dans le calcul de dimensionnement ou de vérification : ces incertitudes concernent les valeurs à adopter pour les paramètres définissant l'ouvrage étudié tels les charges, le frottement interne du sol, la cohésion...
Les facteurs de sécurité partiels ont été obtenus par calibrage avec les méthodes traditionnelles utilisant les facteurs de sécurité globaux, de manière à assurer la même marge de sécurité que celle fournie par la bonne pratique et l'expérience. C'est sur ces bases qu'ont été rédigés les différents codes de réglementation technique tels que les documents de calculs nord-américains (ANSI A58 en 1980 et Canadian Foundation Engineering Manual en 1985 ainsi que l'Eurocode 7 en 1992). Les facteurs de sécurité partiels plus particulièrement applicables aux géotextiles ont été définis par concertation entre les fabricants, les concepteurs, les universités et les clients réunis au sein du CFG.

D'après le concept de calcul aux ELU, la sécurité peut être évaluée par un critère nommé critère de rupture. Nous allons calculer dans certains schémas de rupture un facteur **F** rapport de l'action des forces résistantes R (valeurs après application des facteurs de sécurité partiels) mobilisables pour la stabilité à l'action des forces motrices M tendant à déstabiliser appliquées au bloc de rupture considéré. Si celui-ci est trouvé inférieur à une valeur réglementaire prenant en compte les erreurs sur la méthode, la stabilité n'est pas assurée, il convient de changer les données géométriques du talus ou les chargements ou les résistances.

La valeur du coefficient de sécurité admissible $\mathbf{F}_{admissible}$ est déterminée de manière à prendre en compte certaines incertitudes du problème :

- les incertitudes grossières, ce sont les erreurs humaines et celles dues au hasard,
- les incertitudes de système : ces incertitudes sont dues au manque de confiance accordé à un modèle théorique lorsqu'il est utilisé pour décrire le comportement d'un ouvrage donné, en considérant un ensemble précis de paramètres.

Les combinaisons d'actions appliquées au mur, suivant que l'on se place à l'Etat Limite Ultime (ELU), à l'Etat Limite de Service (ELS) ou à Etats Limites de Stabilité d'Ensemble (ELSE) pour le cas de séisme, sont définies par les textes ou fixées par le marché. Plus précisément les calculs justificatifs sont de trois ordres :

- la stabilité interne de la structure doit être justifiée, à l'état limite ultime, vis-à-vis du glissement sur la base, du poinçonnement de la couche de fondation et de la résistance à la traction du géotextile (justification vis-à-vis de la résistance des sections),
- la stabilité externe doit être vérifiée à l'état limite ultime pour des ruptures sur des surfaces de glissement (justification vis-à-vis de la résistance des sections),
- la stabilité interne et externe doit être vérifiée à l'état limite de service pour l'allongement maximum autorisé du géotextile ainsi qu'au poinçonnement de la couche de fondation (justification vis-à-vis des déformations admissibles).

Cette étude de stabilité intégrera la prise en compte de coefficient de sécurité généralement fixé à 1,5 pour des ouvrages permanents en conditions normales de service et à 1,3 pour des ouvrages temporaires ou des ouvrages en conditions exceptionnelles (chômage de canaux).
Les conclusions de cette analyse de la stabilité indiqueront au projeteur s'il est nécessaire de prévoir des dispositions constructives telles que des butées de pied ou des systèmes d'ancrage pour garantir la tenue du dispositif. Nous allons détailler ci-après trois méthodes de calculs s'intégrant dans la théorie des états limites et destinées à apprécier la marge de sécurité dont dispose le talus, en construction et en service.

X.2.3 Stabilité de pente

Les ruptures de pentes peuvent avoir différentes formes, on peut les séparer en deux grandes catégories : les glissements plans ou polygonaux (Nonveiller) et les glissements rotationnels circulaires ou non (Bishop).

- Le glissement plan ou translationnel se développe dans le cas des pentes comportant une couche mince de mauvaises caractéristiques ou dans le cas d'une interface entre deux sols différents.
- Le glissement rotationnel se produit dans des remblais homogènes artificiels ou dans les pentes naturelles n'ayant pas d'hétérogénéités planes.

Une conjugaison des deux types de glissements précédemment exposés peut survenir lorsque l'un des types de glissement provoque la disparition de la butée empêchant l'autre type d'apparaître.

X.2.3.1 Modélisation théorique des ruptures

L'informatique a permis de mettre en œuvre des modélisations mathématiques faisant appel à des surfaces de glissement nécessitant un nombre important de paramètres.
On suppose que le massif a une longueur suffisamment grande par rapport à ses autres dimensions et des caractéristiques constantes afin de ramener le calcul de stabilité à un calcul bidimensionnel. On considère alors une tranche d'épaisseur unitaire de massif.
On peut classer les ruptures de talus en plusieurs types : rupture de pied de talus, rupture profonde ; on peut en définir d'autres :

- rupture polygonale : adaptée pour solliciter des plans (nombre de paramètres = nombre de points de la ligne). Cette approche permet d'obtenir rapidement des lignes de rupture.
- rupture circulaire (3 paramètres X_p ; Y_p ; R) : la plus simple à réaliser.
- rupture parabolique (2 paramètres H et λ) : son équation est : $x = -\frac{\lambda}{H}.x^2 + \lambda.H$. Il y a peu de paramètres mais une tangente relativement inclinée en pied de talus.
- rupture en forme de spirale logarithmique (4 paramètres X_p ; Y_p ; H ; λ) : à partir du pôle P $r = r_o . e^{\omega}.\tan(\delta)$

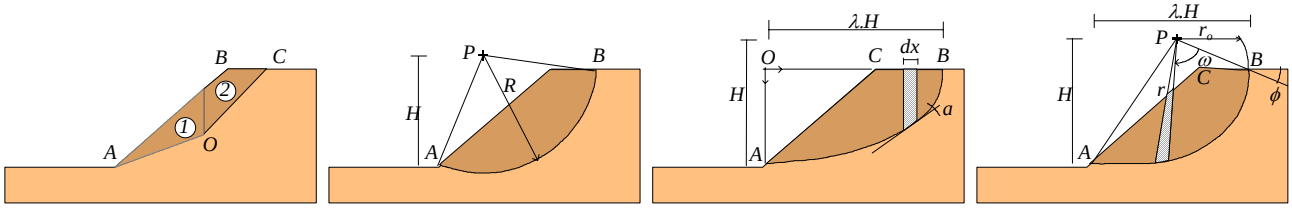


Fig. X-5 ligne de rupture polygonale, circulaire, parabolique et en forme de spirale logarithmique

La jonction de la ligne de rupture au pied de talus a une tangente horizontale permettant de suivre une strate horizontale. De plus en haut de talus la tangente est verticale, ce qui est intéressant

lorsqu'il y a apparition de contraintes de traction dans le massif du fait du déplacement du mur poids. On peut donc prendre en compte les fissures apparaissant dans le massif et qui ont souvent été constatées sur le terrain.

X.2.3.2 Définition du coefficient de sécurité F

Soit V volume limité par le terrain naturel et une frontière quelconque. Le coefficient de sécurité **F** du volume V, supposé constant le long de la frontière est le rapport de la contrainte de cisaillement maximale admissible dans le sol à la contrainte de cisaillement mobilisée le long de la frontière. Cela revient à considérer que le volume V est à l'"équilibre limite", c'est-à-dire que le moment actif est égal au moment résistant maximal avec les caractéristiques réduites $\frac{c}{F}$ et $\arctan(\frac{\tan(\phi)}{F})$. Le coefficient de sécurité **F** de l'ouvrage est alors la valeur minimale de **F** lorsque le volume V varie.

- **F** ne prend pas en compte des facteurs de sécurité différents sur la cohésion et sur l'angle de frottement,
- dans le cas d'un ouvrage renforcé, la définition même du coefficient de sécurité **F** peut être mise en défaut indépendamment de la méthode de calcul employée : on peut montrer que **F** devient infini au-delà d'un certain niveau de renforcement.
- dans le cas d'un sol hétérogène, **F** ne permet pas de définir des coefficients de sécurité différents sur les capacités de résistance de chaque types de sol, on prend une valeur moyenne des valeurs de C et ϕ pour l'ensemble de l'ouvrage.

La surface de rupture est alors celle définie par le coefficient minimal.

X.2.3.3 Résolution

Les différentes méthodes de calculs présentées ont pour buts communs de définir la surface de glissement la plus probable parmi un très grand nombre de surfaces de rupture possibles ceci afin de cerner la zone la plus menacée, de définir la géométrie de rupture éventuelle. Les méthodes de calcul les plus utilisées par les maîtres d'oeuvre publics et privés, sont les méthodes d'équilibre limite. L'évolution de ces méthodes a conduit à des logiciels comme Petal, Cartage... développés conjointement par les Universités et les Laboratoires des Ponts et Chaussées, ils sont bien adaptés au calcul d'ouvrages en textiles bidimensionnels.
Les paramètres mécaniques peuvent être déterminés :

- par des essais de laboratoire,
- par corrélations avec des caractéristiques d'identification simples (à défaut d'autre donnée),

par analyse à rebours de la rupture (ou d'autres glissements dans des sites analogues du voisinage).

X.2.4 Stabilité des murs poids : méthode des trois coefficients

X.2.4.1 Théorie

Le calcul des écrans de soutènement découle de l'étude de la rupture du terrain situé derrière le mur. On considère un massif soutenu par un écran. On suppose que le massif est en équilibre, le massif peut donc supporter de petites déformations sans qu'il y ait risque de rupture. Dans cette position, le massif exerce sur l'écran une action à laquelle on a donné le nom de pression au repos.
On constate qu'à la rupture, une fissure partage le massif en deux à partir du pied du mur, sensiblement rectiligne en partie haute, elle s'incurve au voisinage de l'écran. La rugosité de l'écran a donc une influence notable sur la forme de cette partie curviligne. L'obliquité δ des contraintes au contact du massif et de l'écran est donc, dans ce cas une donnée physique comme l'angle de frottement interne des terres. L'obliquité δ varie en valeur absolue entre 0 (écran parfaitement lisse) et ϕ (écran parfaitement rugueux) valeur qu'elle ne peut pas dépasser.
Six forces ou groupes de forces sollicitent ces ouvrages : la poussée des terres P et la surcharge Q sur la paroi qui fait soutènement, la butée B sur la face opposée de la fondation, la réaction R du terrain de fondation, éventuellement les pressions S dues à la nappe phréatique et plus généralement les efforts de l'eau sur l'ouvrage et enfin le poids W du mur lui-même et les efforts d'ancrages F i . Le calcul de W est simple, il en va de même pour S si l'eau est au repos. Pour des raisons de sécurité, on fait souvent abstraction de la butée B . L'essentiel du problème est donc de déterminer la poussée des terres P . On vérifie ensuite que le terrain peut développer la réaction R et les ancrages, les réactions Fi et que la stabilité de l'ouvrage est assurée.

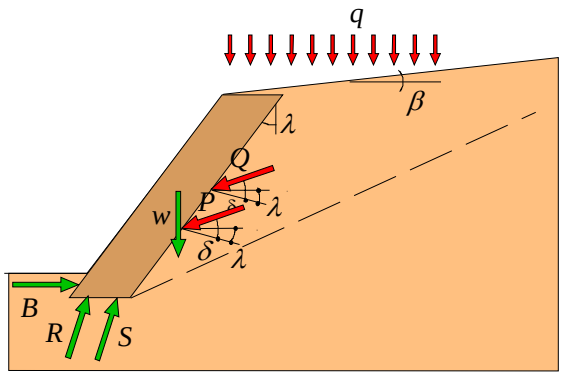


Fig. X-6 schéma du mur

La méthode des trois coefficients consiste à vérifier la stabilité du mur de trois manière différentes :
a) Vérification de la stabilité au renversement par rapport à O (ELU)
b) Vérification de la stabilité au glissement sur la base (ELU)
c) Vérification du non poinçonnement du sol de fondation (ELU,ELS)

X.2.5 Prise en compte des ancrages

La méthode des trois coefficients est une méthode standard de calcul à la limite. La prise en compte des ancrages peut être introduite de manière simple. Elle ne tient cependant pas compte des déformations des géotextiles. Cette méthode vérifie à la fois l'équilibre global des forces et l'équilibre local.

X.2.6 Glissements plans sur talus

Les méthodes des lignes de glissement incluent les méthodes de Coulomb et la méthode des blocs. La méthode des blocs est la méthode la plus répandue dans le monde pour le dimensionnement des ouvrages à talus vertical ou subvertical. Les lignes de glissement sont utilisées pour des ruptures de formes polygonales. La résolution consiste en la construction d'un funiculaire des forces. Des études comparatives ont montré que la méthode des blocs donne des coefficients de sécurité très voisins de ceux de la méthode des perturbations.

La détermination de **F** résulte du calcul du rapport $\frac{\text{Forces resistantes}}{\text{Forces motrices}}$ qui est supposé égal à 1 à la rupture. On réalise dans un premier temps le calcul du talus simple, puis dans un deuxième temps on calcule l'ouvrage. Si le critère sur le coefficient de sécurité n'est pas vérifié, un nouveau calcul est initié.

Les paramètres nécessaires à la vérification de la stabilité sont :
géométrie
longueur ***(L)***
hauteur (***H***)
pente ***(β)***des talus avec sin(***β***)=***H***/***L***.
l'épaisseur de sol rapporté ou du conteneur ***(e)***
profondeur de la tranchée d'ancrage ***(p)***

efforts moteurs :
- l'effort total de glissement (***t*****c**) déduits de la géométrie (***e, L***), du poids volumique du sol et de la hauteur de l'eau ***PBE***
- force de soulèvement ***(s)*** due au vent ou aux vagues ou au batillage.

efforts résistants *dus à*
- reprise par le sol sous jacent (***t*****s**) fonction des paramètres de résistance du sol : cohésion et angle de frottement interne
- reprise par géonatte (***t*****cs**) fonction des caratéristiques d'interface.

- résistance à la traction du géosynthétique (***t_g***) : il s'agit de la résistance à la traction dans le plan pour une nappe ou dans les bandes et les liaisons pour les géoalvéoles
- micro-clouage ou épinglage espacé le long de la pente (***t_s***)
- ancrage en tête (***fa***)

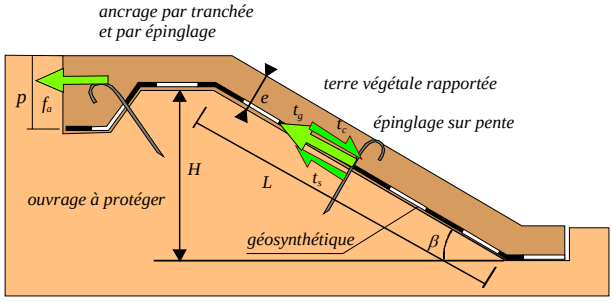


Fig. X-7 schéma de résolution pour RSA

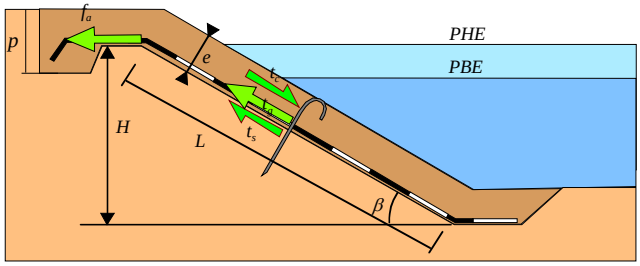


Fig. X-8 schéma de résolution pour FSP

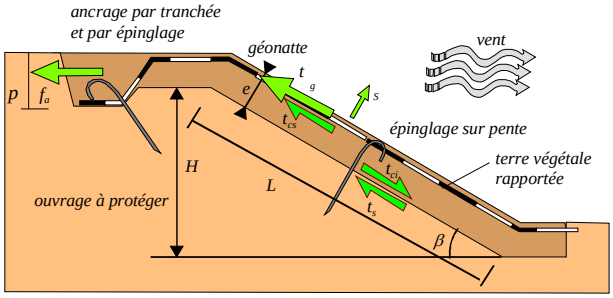


Fig. X-9 schéma de résolution pour PSA

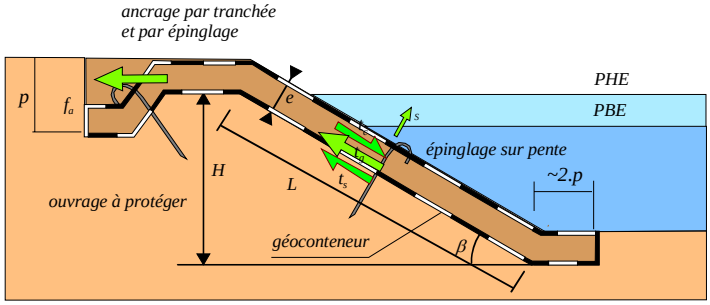


Fig. X-10 schéma de résolution pour CGC

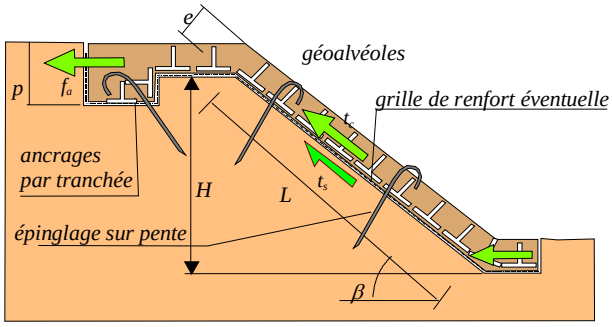


Fig. X-11 schéma de résolution pour CGA

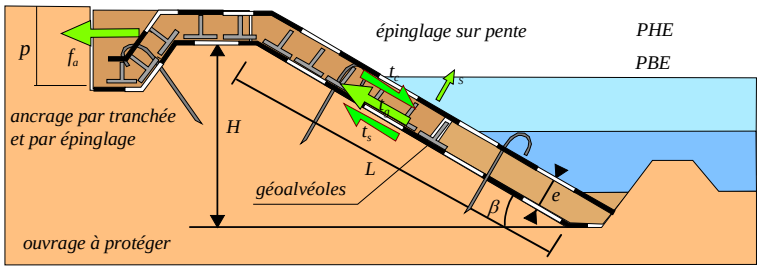


Fig. X-12 schéma de résolution pour CGA

Les méthodes de calcul sont données pour une protection constituée d'une couche de sol mais peuvent être reprises dans leur principe pour un calcul de stabilité d'autres dispositifs de protection sur géomembrane (éléments béton préfabriqués,…). Dans le cas de dispositifs de protection non mis en place sur géomembrane, l'approche du calcul de stabilité est sensiblement différente, notamment dans le sens ou l'ancrage n'est pas obligatoirement reporté en tête de talus mais plutôt réparti sur l'ensemble du talus.
La nécessité de mettre en place des ancrages de type piquets répartis sur la pente du talus sera dictée par le calcul.

Le guide LCPC/SETRA ne prend pas en compte l'effet stabilisateur de la butée de pied qui peut être prépondérant dans le cas de pentes de faible hauteur, protégées par des matériaux granulaires, d'autant plus s'il s'agit d'enrochements (LCPC/SETRA, 1994). Concernant le dimensionnement des tranchés d'ancrage, nous avons actuellement peu d'éléments de calcul proposés dans la bibliographie et surtout pas de méthode de dimensionnement validée. La méthode proposée dans le guide LCPC/SETRA est peut-être un peu complexe pour des cas simples et peut se révéler parfois "optimiste" (voir paragraphe 2 ci-après).

Un élément important du calcul de stabilité est la prise en compte des conditions hydrauliques au niveau des interfaces qui dépendent de nombreux paramètres tels que la perméabilité de la structure

de protection, la transmissivité et la perméabilité des géosynthétiques, la présence d'une nappe sous le complexe géosynthétique et également la présence d'un plan d'eau et surtout ses variations rapides de niveau.

X.2.6.1 Prise en compte des ancrages de type piquet

La méthode de calcul doit tenir compte des différents modes de rupture d'un massif en sol renforcé au niveau des ancrages de type piquet :

- glissement du revêtement par dépassement du frottement latéral (interface) limite sol-complexe : il se produit lorsque le coefficient de frottement apparent sol- revêtement n'est pas suffisant avec une longueur adéquate d'ancrage pour équilibrer l'effort de traction,
- rupture du revêtement en traction : elle résulte d'une résistance insuffisante de celui-ci, soit du fait d'un sous-dimensionnement, soit d'un niveau de sollicitation plus élevé que prévu,

La mobilisation des efforts de traction est fonction principalement de l'inclinaison du revêtement sur la surface de glissement et son intensité fait intervenir à la fois les caractéristiques du renforcement (périmètre, hauteur) du sol et de l'interface sol-renforcement.

La ligne de rupture décrite précédemment définit l'existence d'une zone active et d'une zone passive. La zone active est le revêtement. La ligne de glissement est le lieu présumé des tensions maximales correspondant à l'inversion du sens des contraintes tangentielles à l'interface sol géotextile. La zone active est supposée glisser sans déformation d'ensemble. Les déplacements de la zone active en rupture induisent à l'interface sol-nappe des contraintes tangentielles de friction dans les deux zones ancrées : active et passive.
L'ancrage de type piquet possède une extrémité libre et une extrémité prise au sein du revêtement. C'est cette tension à l'intersection avec la zone de sol plastifiée qui sera équilibrée par les contraintes de friction du sol le long de l'ancrage de type piquet.

Un ancrage T au niveau de la surface de rupture intervient de deux manières :

- par la composante tangentielle de T soit $t=T.\cos(\alpha+\beta)$
- par sa composante normale qui augmente le poids apparent du massif instable et induit une réaction n inclinée de l'angle ϕ sur la ligne de glissement. $n=Tn.\tan\phi=T.\tan(\alpha+\beta).\tan\phi$

Ces efforts sont introduits, pour le calcul du facteur de sécurité défini, dans l'équilibre du bloc dont la frontière intercepte l'ancrage.

Dans le cas d'un revêtement sur un complexe étanche, l'ancrage sera fait par un géosynthétique et des ligatures. On ne prendra en compte dans le calcul que l'effort tangentiel, qui sera transmis à la tranchée d'ancrage.

X.2.6.2 Prise en compte de la tranchée d'ancrage

L'objectif dans ce document n'est pas de détailler une méthode de dimensionnement qui fait encore l'objet de travaux de recherche (cf. références bibliographiques) mais de définir les principes généraux de la conception d'un ancrage en tranchée.

La tranchée d'ancrage classique (figure-X.8) est définie géométriquement par les trois dimensions suivantes :

- ➔ la longueur L entre le talus et la tranchée,
- ➔ la profondeur D de la tranchée,
- ➔ la largeur B de la tranchée.

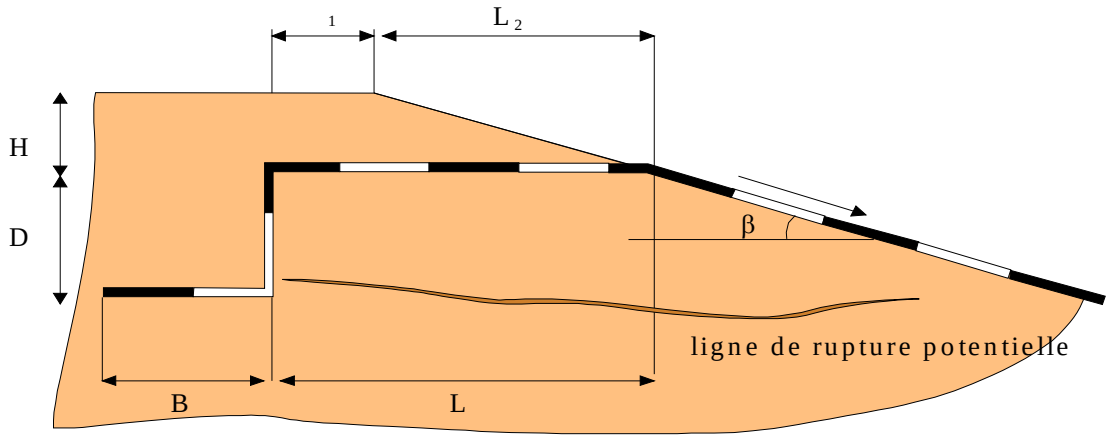


Fig. X-13 ***Schéma d'un ancrage complet en tranchée***

La capacité d'ancrage d'une tranchée (fa sur la figure X–7) peut être définie par la somme des forces de frottement du géosynthétique ancré sur chacune des 3 longueurs définies ci-dessus. En effet, les quelques expérimentations réalisées jusqu'à présent montrent qu'il est préférable de négliger l'effet de majoration de la force d'ancrage engendré par les angles que fait le géosynthétique ; d'une part, cette majoration est relativement faible et, de plus, les méthodes actuellement proposées prenant en compte ces effets d'angle conduisent généralement à surestimer la capacité d'ancrage réelle.
Pour le calcul des forces de frottement les contraintes à prendre en compte sont celles induites par le poids des terres pour les parties horizontales L et B ; pour la partie verticale D, la contrainte horizontale appliquée correspond à la poussée des terres au repos.
En ce qui concerne les angles de frottement aux interfaces, dans le cas d'un complexe comprenant plusieurs géosynthétiques ancrés dans la tranchée, on mènera le calcul avec respectivement l'angle de frottement le plus faible du dessus et du dessous du géosynthétique assurant l'ancrage. Notons à ce sujet que sur la partie horizontale L, on ne prendra en compte que le frottement sur la face inférieure pour tenir compte du fait que l'ensemble des terres sus-jacentes est susceptible de se déplacer avec le géosynthétique.
Dans la pratique, lorsque la hauteur de couverture H est limitée à quelques décimètres et L de l'ordre du mètre ou inférieure, la force d'ancrage sur la partie L est négligeable devant celle des parties D et B. Dans ces conditions, il est recommandé de faire le dimensionnement en ne prenant en compte que la capacité d'ancrage sur les longueurs B et D ; toutefois, une longueur L minimum est déterminée de manière à éviter une rupture par cisaillement du massif de sol situé sous le(s) géosynthétique(s) entre la tranchée et le talus.
Le choix du géotextile ou produit apparenté devra prendre en compte des coefficients de sécurité adaptés au type de produit et ce géosynthétique devra présenté des déformations compatibles avec l'ouvrage.

X.2.6.3 Résolution

Le schéma de résolution de cette méthode est le suivant

1. déplacement du bloc : effort aux interfaces calcul de F
2. calcul des efforts dans les nappes calcul de F
3. avec la méthode d'homogénéisation à partir des déformations, nous calculons les contraintes dans le mur
4. si présence d'une surcharge calcul de l'incrément de contrainte apporté par celle-ci
5. vérification du critère anisotrope
7. comparaison des valeurs de F et Fmur avec les valeurs réglementaires.

X.2.6.4 Références bibliographiques :

BRIANCON L., GIRARD H., POULAIN D. and MAZEAU N. (2000) Design of anchoring at the top of slopes for geomembrane lining systems. In: 2nd European geosynthetics conference, EUROGEO 2000, Bologna, Italy, , October 15-18, Pàtron editore, Bologna, vol. 2, pp 645-650.

BRIANÇON L., GIRARD H., POULAIN D., CHAREYRE B. (2002) Dimensionnement des tranchées d'ancrage en tête de talus des dispositifs d'étanchéité par géomembrane. Revue Française de Géotechnique, à paraître.